

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie civil et de génie du bâtiment

ÉLABORATION D'UN SYSTÈME DE PRÉVISION HYDROLOGIQUE D'ENSEMBLE
POUR LA GESTION EN TEMPS RÉEL DES BARRAGES SUR LA RIVIÈRE SHIPSHAW

Mémoire de maîtrise

Spécialité : Génie civil et de génie du bâtiment

Estelle REIG

Jury : Marie-Amélie BOUCHER (directrice)

Mélanie TRUDEL

Richard ARSENAULT

i. Résumé

Plusieurs sociétés propriétaires de centrales hydroélectriques basent la gestion de leurs barrages sur le jugement expert. C'est le cas pour Produits Forestiers Résolu (PFR), qui est un producteur de pâtes et de papiers, propriétaire de quatre centrales hydro-électriques sur la rivière Shipshaw (Québec, Canada). Ces centrales répondent autant que possible aux besoins énergétiques de leurs deux usines voisines (Alma et Kénogami). Dans le cadre de cette étude, un système de prévision d'ensemble du débit pour la rivière Shipshaw a été développé et couplé à un modèle de réservoirs. La performance de ce système pour la gestion des opérations sur les barrages a ensuite été comparée à la gestion des réservoirs basée sur le jugement expert, sur la base d'événements passés. L'étude présentée ici vise à vérifier l'hypothèse selon laquelle cet outil d'aide à la prise de décision (correspondant aux deux modèles couplés) permettrait de mieux satisfaire les règles de gestion des réservoirs qu'un mode de décision basé uniquement sur le jugement expert. Le modèle hydrologique HEC-HMS et le modèle de réservoirs HEC-ResSim, tous deux développés par l'USACE (*United State Army Corps of Engineers*), ont été utilisés car ils répondent aux besoins de PFR : ils possèdent des interfaces graphiques, ils sont gratuits et simples. La difficulté principale de cette étude est qu'aucune mesure de débit naturel (sans barrages) n'existe pour la rivière Shipshaw. Dans un premier temps, les débits ont donc été renaturalisés à l'aide de l'équation de continuité appliquée aux niveaux des réservoirs et aux débits turbinés. Cependant, les résultats ont été jugés non satisfaisants. Pour cette raison, une des innovations de cette étude est l'utilisation de la méthode de régionalisation basée sur la similitude physique entre les sous-bassins de la rivière Shipshaw et des bassins versants jaugés dans un contexte où HEC-HMS fait partie d'un système d'aide à la prise de décision. Une fois le modèle hydrologique calibré à l'aide des bassins versants donneurs, il a été alimenté par des prévisions météorologiques d'ensemble d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). Ces prévisions sont constituées de 20 membres, avec un horizon de 10 jours et un pas de temps de 6 heures. Les prévisions de débits ont ensuite été utilisées comme entrées du modèle de réservoir afin de produire des scénarios de gestion. La seconde innovation de cette étude est la comparaison des résultats obtenus avec les opérations réelles effectuées. En effet, pour les trois périodes analysées (automne 2010, printemps 2013 et été 2015), cette comparaison démontre la supériorité du système formel mis en place. Ces résultats valident l'hypothèse de départ : l'utilisation de cet outil aurait pu aider à éviter des inondations passées et même augmenter la production énergétique. Plus généralement, cet outil peut permettre au gestionnaire l'anticipation d'événements à une plus grande échelle que lorsque la gestion est uniquement appuyée sur l'expérience. Enfin, la simplicité et la flexibilité de ces deux modèles les rend facilement transférables à d'autres contextes opérationnels où les prévisions sont nécessaires pour compléter la connaissance des experts.

Mots clés : barrages hydro-électriques, gestion des réservoirs, prévision hydrologique, HEC-HMS, HEC-ResSim, prévisions météorologiques d'ensemble, bassin versant non jaugé, régionalisation par similitude physique.

ii. Abstract

Several companies which own hydropower plants base the management of their reservoirs on expert judgement. Resolute Forest Products (RFP) is a pulp and paper producer which owns four hydropower plants on the Shipshaw River (Quebec, Canada) to meet the energy requirements of their nearby factories as much as possible (Alma and Kénogami). In this study, a simple ensemble inflow forecasting system has been developed. This system is also coupled with a reservoir model. The goal of the study is to verify the hypothesis according to which using a decision support system (formed of the two coupled models) would allow for more efficient water management and hydropower production than relying on expert judgment alone. The modeling was performed using the HEC suite (developed by the United States Army Corps of Engineers), as it fulfills the requirements of RFP: graphical user interfaces, free and simple. The main difficulty of this study is that no natural streamflow measurements are available for the Shipshaw River. To overcome this, streamflow was reconstituted using the continuity equation but the results were judged unsatisfactory. Hence, one of the innovations of this study is to calibrate the hydrological model with the physical similarity regionalization method in a context where HEC-HMS is part of the decision support system. The calibrated hydrological model was fed ensemble meteorological forecasts from ECCC (Environment and Climate change Canada). Those forecasts include 20 members, with a 10-day horizon and a 6-hour time step. Results confirm our initial hypothesis, as they show that the decision support system could have helped avoiding flood events in the recent past and produced more energy. This tool can allow water resources managers to anticipate events with more lead time than expert judgment. Those simple tools are well adaptable and relatively easy to transfer to other operational contexts where forecasts are needed to supplement expert judgement.

Keywords: hydropower, reservoir management, hydrological forecasts, HEC-HMS, HEC-ResSim, ensemble meteorological forecasts, ungauged catchments, regionalization based on physical similarity.

iii. Remerciements

Mes premiers remerciements vont directement à ma directrice de recherche, la professeure Marie-Amélie Boucher, merci pour m'avoir proposé cette étude il y a environ deux ans, merci pour s'être montrée toujours disponible et dévouée avec autant d'énergie et de gaieté. Merci pour tous ses précieux conseils, sa patience et enfin merci de m'avoir encouragée jusqu'à la fin du projet.

Je voudrais également remercier Éric Tremblay, le directeur de Hydro-Saguenay, pour s'être montré disponible, pour ses conseils et commentaires et pour m'avoir fait confiance durant ces deux années. Merci à lui et à toute la chaleureuse équipe d'Hydro-Saguenay pour m'avoir accueillie dans leurs locaux.

Merci aux membres du GREAUS pour leur convivialité et leur esprit d'entraide.

Enfin, je tiens à remercier le partenaire industriel Produits Forestiers Résolu (PFR) et le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) pour avoir soutenu mon projet de recherche.

Cette vie au Québec m'a permis de rencontrer de nombreuses personnes très différentes et de nouveaux amis devenus une deuxième famille, je les remercie tous, pour avoir rendu cette expérience de vie unique.

Enfin, mes derniers remerciements vont à ma famille, mes parents et mes sœurs qui m'ont toujours encouragée et qui ont toujours été présent même dans les moments difficiles malgré la distance. Merci d'avoir été une source de motivation.

Table des matières

1	INTRODUCTION.....	11
1.1	Mise en contexte	11
1.1.1	Présentation du partenaire industriel	11
1.1.2	Gestion des réservoirs et problématique.....	12
1.2	Objectifs et contribution originale	13
1.3	Présentation de la zone d'étude	14
1.4	Données hydrométéorologiques	17
2	ÉTAT DE L'ART.....	19
2.1	Choix du modèle hydrologique.....	19
2.2	Prévision hydrologique des bassins versants non jaugés.....	21
2.3	Prévisions météorologiques d'ensemble.....	23
2.4	Modèle de gestion des réservoirs.....	24
3	MÉTHODOLOGIE.....	26
3.1	Reconstitution des apports naturels	26
3.1.1	Reconstitution par bilan de masse	26
3.1.2	Reconstitution par régionalisation.....	26
3.2	Modèle hydrologique.....	30
3.2.1	Présentation du modèle.....	30
3.2.2	Choix des indices de performance : NSE, RMSE, MAE	33
3.3	Modèle de réservoirs.....	34
3.4	Le couplage des deux modèles pour l'aide à la décision.....	38
4	ARTICLE SCIENTIFIQUE.....	41
4.1	Abstract.....	42
4.2	Introduction.....	43
4.3	Study area	45
4.4	Methodology.....	47
4.4.1	The HEC-HMS hydrological model.....	47
4.4.2	Natural streamflow reconstruction	48

4.5	Hydrometeorological data.....	51
4.5.1	Presentation	51
4.5.2	Calibration	52
4.6	ResSim reservoir model.....	55
4.6.1	Presentation	55
4.6.2	Structure of the reservoir model	55
4.7	The decision-support system and its evaluation	58
4.7.1	Presentation	58
4.7.2	Verification.....	58
4.8	Results.....	59
4.8.1	Validation of the calibration method	59
4.8.2	Inflow forecasts for the ungauged sub-catchments of the Shipshaw River.....	61
4.8.3	Comparison of actual and proposed operations using the HEC-ResSim and ensemble inflow forecasts	67
4.8.3.1	Fall 2010.....	67
4.8.3.2	Spring 2013 and Summer 2015.....	69
4.8.3.3	Discussion	70
4.9	Conclusion	73
5	CONCLUSION	74
	ANNEXES	76
	RÉFÉRENCES	90

Liste des figures

Figure 1: Localisation et délimitation des sous-bassins de la rivière Shipshaw.....	16
Figure 2 : Schéma des ouvrages hydrauliques à Onatchiway et Lamothe (tiré de SNC Lavalin, 200).....	38
Figure 3 : Schéma du système du modèle d'aide à la prise de décision.....	40
Figure 4: Localisation of the Shipshaw River catchment.....	46
Figure 5: Localisation of the donor catchments	54
Figure 6: Schematic representation of hydraulic structures outlet at Onatchiway and Lamothe reservoirs (modified from SNC Lavalin 2000).....	56
Figure 7: Evolution of the CRPS with the forecasting horizon for (a) Onatchiway and (b) Lamothe	62
Figure 8: Reliability diagrams for precipitation forecasts 1, 5 and 10 day ahead	63
Figure 9: Reliability diagrams for temperature forecasts 1, 5 and 10 day ahead	64
Figure 10: Reliability diagrams for streamflow forecasts 1, 5 and 10 day ahead	66
Figure 11: Evolution of the water level in the Onatchiway and Lamothe reservoirs during fall 2010	68
Figure 12: Reservoirs 'elevations simulated by the reservoir model fed with the reconstructed streamflow climatology of the past 20 years	69
Figure 13 : Evolution of the water level in the Onatchiway and Lamothe reservoirs during the period of Spring 2013	70
Figure 14: total energy produced by the model is compared with the actual production in Fall 2010 (a), Spring 2013 (b) and Summer 2015 (c).....	72

Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques principales des réservoirs de la rivière Shipshaw	12
Tableau 2: Proposition de la classification des modèles hydrologiques (tiré de Singh, 1995) .	19
Tableau 3: Liste et poids des caractéristiques physiques	29
Tableau 4: Exemple d'indices de performances pour les 3 BV	30
Tableau 5: Caractéristiques physiques des ouvrages hydrauliques au réservoir Onatchiway (a et b) et au réservoir Lamothe (c et d).....	37
Tableau 6: Règles relatives au taux maximal de remplissage du réservoir Onatchiway.....	37
Table 7: Applied weights to catchment attributes	50
Table 8: characteristics of the donor catchments used for the sub-catchement of the Shipshaw River	53
Table 9: Physical characteristics of the Onatchiway and Lamothe reservoirs	57
Table 10: The maximum filing rate rule.....	58
Table 11: Performance metrics obtained during the calibration and validation of the three catchments used to test the regionalization approach.....	60
Table 12: The CRPS skill scores (no units) for precipitation ensemble forecasts (Environment and Climate Change Canada) versus the observed precipitation data (MELCC)	62

1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

58.9% de l'énergie totale produite au Canada provient de l'hydro-électricité (Gouvernement du Canada, 2018), ce qui classe le pays au deuxième rang mondial des producteurs hydro-électriques. Avec 3% de l'eau douce de la planète sur le territoire Québécois [Gouvernement du Canada, 2018], la province est la première productrice d'hydro-électricité du Canada. La région du Saguenay-Lac-Saint-Jean (Québec, Canada) s'est développée autour de cette énergie, attirant les industries forestières et d'aluminium dans un premier temps.

1.1.1 Présentation du partenaire industriel

Produits Forestiers Résolu (PFR) est une société productrice de bois, de papiers et de pâte à papier aux États-Unis et au Canada. Elle a été créée en 1816 sous le nom de *William Price and Company*, dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean (Québec, Canada). Dans les années 1930, la société fusionne avec d'autres compagnies et construit des barrages hydro-électriques pour alimenter en énergie deux de leurs usines situées à Kénogami et Alma (Saguenay-Lac-Saint-Jean, Québec, Canada).

La division Hydro-Saguenay de PFR gère les huit centrales hydro-électriques de la région et exploite son propre réseau de lignes de transport et de distribution reliant les centrales aux usines. Les barrages hydro-électriques sont situés sur les rivières Aux Sables, Chicoutimi et Shipshaw. Les centrales produisent au total une moyenne de 1 000 GWh par an, pour une consommation de 1 500 GWh par an. Afin de répondre à la demande, Hydro-Saguenay achète de l'électricité à Hydro-Québec.

La rivière Shipshaw constitue la base du système hydro-électrique de PFR avec cinq barrages et quatre centrales hydro-électriques qui représentent 82% à 85% de la puissance installée disponible. Quatre de ces barrages ont en amont un réservoir naturel ou artificiel. Le cinquième barrage, situé le plus en aval du bassin versant (BV) de la rivière Shipshaw, possède la capacité de retenue la plus

faible du système de réservoirs avec 1.96 hm³. Le tableau 1 présente l'ensemble des caractéristiques principales des réservoirs du bassin de la rivière Shipshaw.

Tableau 1: Caractéristiques principales des réservoirs de la rivière Shipshaw

Réservoirs	Ouvrages hydrauliques	Aire de drainage du sous-bassin (km ²)	Capacité de retenue (hm ³)	Énergie produite maximale (MW)
Lac Onatchiway	Déversoir	1738	370	0
	Ouvrage de contrôle			
Lac Lamothe	Prise d'eau	289	136	60
	Canal d'amenée			
	Ouvrage de contrôle			
Lac au Brochet	Centrale hydro-électrique	20	12	7
	Ouvrage de contrôle			
	Centrale hydro-électrique			
Lac Sébastien	Déversoir	103	24	13.6
	Ouvrage de contrôle			
	Centrale hydro-électrique			
Rivière Shipshaw	Déversoir	120	1.96	55
	Ouvrage de contrôle			
	Prise d'eau			
	Centrale hydro-électrique			

1.1.2 Gestion des réservoirs et problématique

La gestion d'un système de réservoirs implique de considérer de multiple objectifs et contraintes qui ne sont pas en coordination les uns avec les autres. Par exemple, il faut considérer : les risques d'inondation, l'optimisation de la production énergétique, les contraintes liées à la sécurité des barrages ou encore les débits réservés écologiques. Ainsi, le gestionnaire adapte les débits sortants des réservoirs en fonction de la quantité d'eau à emmagasiner dans le système de réservoirs et en fonction des contraintes d'opération du système. Plusieurs études ont utilisé différentes méthodes en vue d'améliorer l'efficacité de la production énergétique des barrages de manière sécuritaire en

utilisant des modèles d'optimisation et/ou des modèles de réservoir [ex. Rani et Moreira, 2010; Alemu et al., 2011; Ziaei et al., 2012].

Hydro-Saguenay, ainsi que la plupart des sociétés possédants des barrages, basent leurs décisions en fonction du jugement expert [ex. Taylor et al., 2015; Ahmed et Mays, 2013], qualifié de subjectif selon Pagano et al. (2016). De plus, le gestionnaire d'Hydro-Saguenay analyse la climatologie passée afin de définir des moments clés d'événements climatologiques importants (par exemple, le moment à partir duquel la neige va commencer à fondre). Cependant, dans un contexte de changements climatiques, se fier à la climatologie passée va devenir de plus en plus difficile à maintenir [ex. Gaudard et al., 2013]. Considérant que la production d'hydro-électricité dépend des précipitations, des apports souterrains, de l'écoulement de surface et de la fonte de la neige, les changements climatiques vont affecter la gestion du système de réservoirs [ex. Bongio et al., 2016; Finger et al., 2015; Huaranga et al., 2014; Golombek et al., 2012].

1.2 Objectifs et contribution originale

L'objectif principal de l'étude est de développer un outil permettant un support au jugement expert, tenant compte des prévisions météorologiques et permettant une aide à la prise de décision quant à la gestion des barrages de la rivière Shipshaw en temps réel. De fait, deux hypothèses sont anticipées :

- L'outil permettra de mieux satisfaire les règles de gestion des réservoirs qu'un mode de décision basé uniquement sur le jugement expert.
- L'outil permettra d'anticiper les événements météorologiques à une plus grande échelle que lorsque la gestion est uniquement appuyée sur l'expérience.

L'étude sera bénéfique au gestionnaire d'Hydro-Saguenay pour les prises de décisions concernant le volume d'eau à soutirer (ou à conserver) provenant des réservoirs et le moment approprié pour le faire. Dans le passé, il est arrivé que des événements pluviométriques excessifs engendrent des inondations mineures. De plus, PFR n'est pas la seule société qui base ses opérations de gestion de barrages sur le jugement expert. L'une des nouveautés de l'étude est la comparaison entre le système opérationnel de PFR et le système d'aide à la prise de décision plus formel mis en place

ici. Les résultats obtenus peuvent peut-être convaincre d'autres sociétés, ayant la même problématique, de se munir d'un tel outil.

La définition des besoins d'Hydro-Saguenay et la revue de littérature ont permis de définir deux objectifs spécifiques. Le premier est de prévoir les apports naturels à l'entrée des réservoirs (donc en amont des barrages) à l'aide d'un modèle hydrologique. Développer un système de prévisions de débits basé sur un modèle hydrologique performant est un sujet encore très actif dans la recherche [ex. Zsoter et al., 2016; Hongjun et Linna, 2012]. Les paramètres du modèle sont fixés de manière à obtenir une réponse hydrologique proche de la réalité. Cette étape est appelée le *calage* du modèle. Or, aucune donnée de débit naturels observés n'est disponible pour le bassin de la rivière Shipshaw. Ainsi, un autre aspect novateur de l'étude est de développer un outil prévisionnel des apports aux réservoirs en situation de BV non jaugé.

Le deuxième objectif spécifique du projet de maîtrise est de prévoir les débits à turbiner à l'aide d'un modèle de réservoir. Ce dernier permet de tenir compte des contraintes d'opération du système et de calculer la quantité d'eau allouée de manière à maximiser la production énergétique tout en permettant une gestion sécuritaire.

1.3 Présentation de la zone d'étude

La rivière Shipshaw est un affluent de la rivière Saguenay. Elle prend sa source dans le lac Pamouscachiou qui provient du réservoir de Pipmuacan, situé plus en amont. Les déversements de ce lac vers la rivière Shipshaw sont contrôlés par le barrage Pamouscachiou-Un, construit par PFR dans les années 1920. Il a été cédé à Hydro-Québec en 1950. Comme le bassin hydrographique de la rivière Shipshaw va au-delà du barrage, PFR a gardé un droit sur l'eau qui tombe sur ce même bassin hydrographique. Ce droit, de 2 303 m³/s/jour en volume d'eau chaque année, permet de combler la demande énergétique des usines (Kénogami et Alma) lorsque celle-ci ne pouvait pas être uniquement satisfaite par les barrages de la rivière Shipshaw.

De fait, les déversements du lac Pamouscachiou vers la rivière Shipshaw présentent des débits faibles par rapport aux débits naturels. L'incidence sur la gestion des réservoirs est faible.

Le débit de la rivière est régularisé par les barrages-déversoirs Onatchiway et Jim Gray, situés en amont du BV. L'aire de drainage du BV est de 2 270 km² au total. La figure 1 présente la localisation du BV.

Pour obtenir le débit des apports naturels en amont de chaque barrage de la rivière Shipshaw, le BV est subdivisé en cinq sous-bassins (voir la figure 1) de manière à ce que l'exutoire de chaque sous-bassin corresponde à la localisation d'un des barrages. La subdivision tient compte du relief du modèle numérique de terrain (MNT). Elle est réalisée à l'aide d'un système d'information géographique (SIG, ArcGIS). Les débits simulés par le modèle hydrologique correspondent donc aux débits des apports naturels à l'entrée de chacun des réservoirs.

La majorité du BV est occupée par des forêts de résineux et de feuillus. Seule la portion sud présente une zone urbaine de 150 km² (la ville de Saint-Ambroise). Les dépôts de surface sont majoritairement composés de blocs, graviers et sables. L'altitude moyenne est de 470 m et la pente moyenne est de 5.5°. Les zones d'altitudes maximales sont principalement localisées dans la portion nord-est du BV.

Les précipitations moyennes annuelles du BV est de 1 020 mm/an. Les températures moyennes estivales sont comprises entre 7°C et 19°C et les températures hivernales sont comprises en moyenne entre -8°C et -21°C.

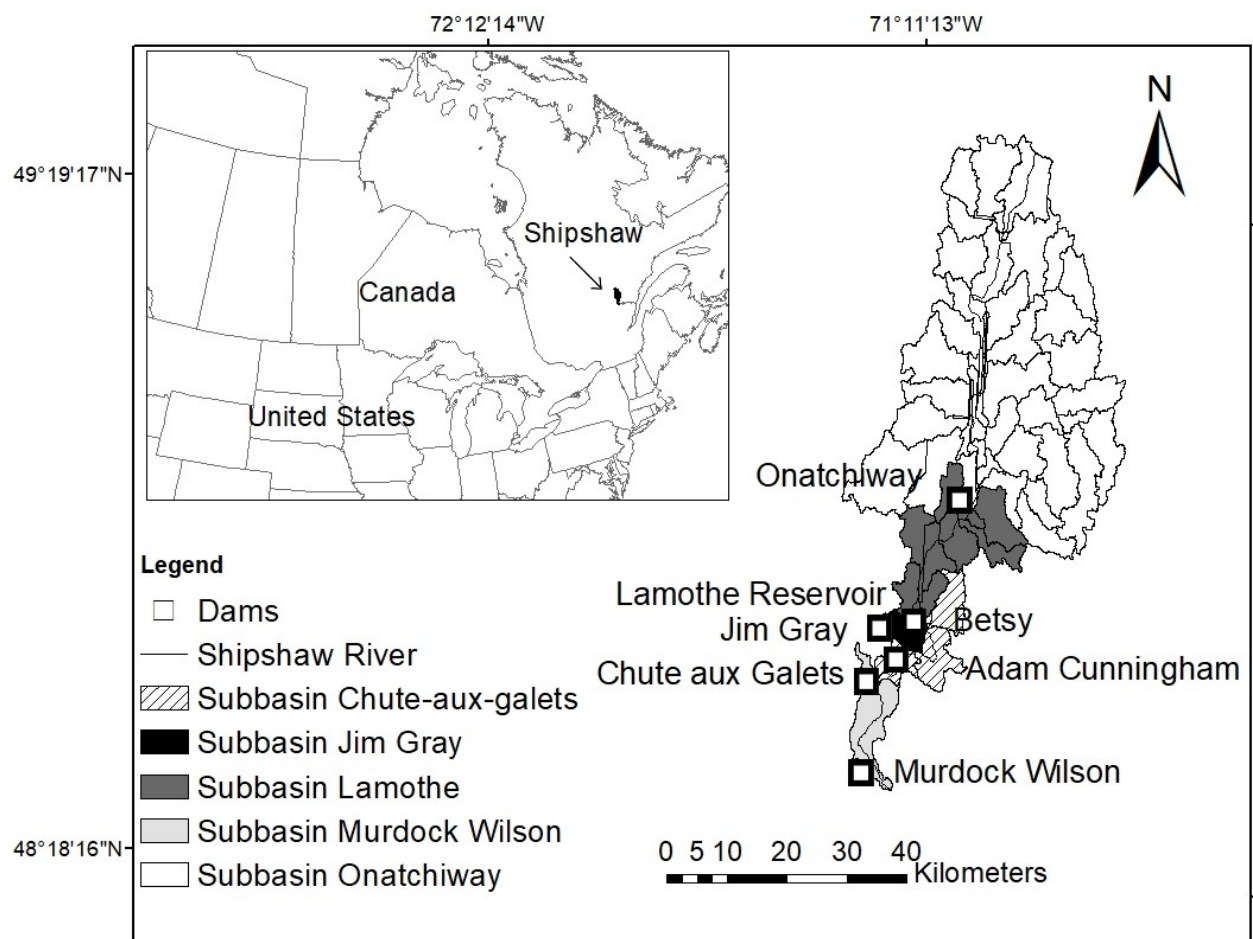


Figure 1: Localisation et délimitation des sous-bassins de la rivière Shipshaw

1.4 Données hydrométéorologiques

La méthode de régionalisation utilisée dans cette étude nécessite une chronique historique de débit observé de tous les BV donneurs (au total 106 BV donneurs tous localisés au Québec). Ces données historiques sont publiquement disponibles sur le site internet de la Direction de l'Expertise Hydrique, une division du Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC).

Les données météorologiques observées (précipitations, température minimale et maximale) proviennent également du MELCC. Elle se présente sous le format d'une grille (10 km × 10 km). Cette grille a été obtenue par krigeage des données provenant des stations météorologiques (Bergeron 2015).

Les données météorologiques d'ensemble (précipitations, température minimale et maximale) ont été récupérées d'Environnement et Changement Climatique Canada provenant du *THORPEX Interactive Grand Global Ensemble* (TIGGE). Cette base de données est maintenue par *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Ces prévisions sont constituées de 20 membres, avec un horizon de 10 jours et un pas de temps de 6 heures. La résolution originale de ces données de 1° a été affinée par interpolation spatiale à 0.1°. Le choix de ces prévisions météorologiques réside dans la longueur des données archivées disponibles (de 2006 à aujourd'hui).

Les prévisions de températures et de précipitation ont été comparées aux données météorologiques observées afin d'analyser si un biais existe. L'annexe A présente les graphiques de comparaison entre les données observées et prévisionnelles pour trois périodes (automne 2010, printemps 2013 et été 2015). Les températures prévues présentent un biais faible lorsqu'elles sont comparées avec les températures observées.

Quant aux données de précipitations observées (P_{obs}) et prévues ($P_{prévi}$), une correction a été appliquée en divisant les données prévisionnelles par le ratio moyen annuel obtenu par :

$$Ratio = \frac{P_{prévi}}{P_{obs}} \quad (1)$$

Cependant, cette correction ne diminue pas le biais. De fait, le biais n'est pas suffisamment important pour faire l'objet d'une correction.

Cette étude est composée de quatre chapitres : l'état de l'art, la méthodologie, l'article scientifique et la conclusion.

2 ÉTAT DE L'ART

2.1 Choix du modèle hydrologique

Le développement informatique et les efforts de recherche pour la compréhension du cycle de l'eau ont permis le développement de nombreux modèles hydrologiques adaptés aux différents objectifs recherchés (ex. reconstitution des débits passés, prévision des débits, etc...). Le tableau 2 illustre une proposition de la classification des différents types de modèles existants.

Tableau 2: Proposition de la classification des modèles hydrologiques (tiré de Singh, 1995)

Représentation du cheminement de l'eau	Modèle physique
	Modèle conceptuel
Représentation spatiale	Modèle global
	Modèle distribué
Représentation temporelle	Évènementiel
	Continu

Un modèle physique se base sur les équations de la physique pour décrire les processus d'écoulement. En opposition, un modèle conceptuel simplifie les formules mathématiques au maximum et intègre d'avantage de paramètres.

Un modèle global considère le BV comme une unité spatiale dans laquelle les caractéristiques physiques (altitudes, pentes, etc...) sont considérées comme uniformes sur l'ensemble du territoire. En opposition, un modèle distribué discrétise le BV en sous-bassins ou en cellules.

Un modèle évènementiel reproduit un événement spécifique, tandis qu'un modèle continu calcule les débits sans interruption.

Dans cette étude, le modèle hydrologique est utilisé pour prévoir le débit des apports naturels des cinq sous-bassins de la rivière Shipshaw en temps réel. C'est pourquoi, le premier critère de sélection du modèle est d'être semi distribué. À cela s'ajoutent des critères répondants aux besoins de PFR : un modèle fiable, gratuit, modélisant l'accumulation de la neige et sa fonte et possédant une interface graphique. Le modèle hydrologique HEC-HMS répond à tous ces critères. Il a été développé par l'USACE [*United-States Army Corps of Engineers*, USACE 2016]. Il tient compte :

- Des caractéristiques physiques du BV,
- Des précipitations,
- Des pertes (ex. par évapotranspiration, par l'infiltration dans le sol et par l'interception des végétaux),
- Du ruissellement superficiel,
- Des échanges souterrains.

Le choix de ce modèle permet un avantage supplémentaire puisque les résultats obtenus peuvent être intégrés à un autre modèle développé par l'USACE, grâce au système de stockage de données spécifique HEC-DSS. C'est pourquoi le modèle de réservoirs HEC-ResSim [USACE, 2013] est retenu pour simuler les opérations sur les réservoirs. De plus, ce modèle répond à l'ensemble des besoins de PFR énoncés précédemment. Le couplage de ces deux modèles a déjà été réalisé par d'autres études pour des applications différentes [ex. Lim et al., 2010; Ahn et al., 2014]. Uysal et al. (2016) ont développé une méthodologie proche de cette étude puisque les auteurs couplent les modèles HEC-HMS et HEC-ResSim pour améliorer la régulation des opérations d'un barrage à multi-objectifs en respectant la demande en eau et en évitant les inondations. La différence principale avec la présente étude c'est que la rivière Shipshaw est non jaugée et qu'elle possède plusieurs barrages comparativement à un seul pour Uysal et al. (2016). Également, Uysal et al. (2016) ne se sont pas intéressés à la comparaison de leur système avec une gestion basée sur le jugement expert, alors que cela constitue un des éléments centraux de la présente étude.

2.2 Prévision hydrologique des bassins versants non jaugés

Le BV de la rivière Shipshaw est considéré comme non jaugé puisqu'il n'y a aucune station de mesure des apports naturels. Seuls les débits sortants des ouvrages hydrauliques sont mesurés. Pour connaître les apports naturels, l'équation de continuité a été appliquée. Cependant, les résultats ont été jugés insatisfaisants puisque la variation des débits ne concordait pas du tout avec la variation climatologique saisonnière (ex. la crue printanière).

Faire de la prévision de débits pour un BV non jaugé est un problème que de nombreux hydrologues essayent de résoudre depuis les années 1970 [ex. James, 1972; Magette et al., 1976]. De plus, dans le but de faire avancer le monde scientifique et à améliorer les prévisions hydrologiques des BV non jaugés, l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques (International Association of Hydrological Science (IAHS)) a lancé en 2003 la décennie dédiée à la prévision des BV non jaugés [Sivapalan et al., 2003]. Le but était de diminuer les incertitudes liées aux prévisions et de développer des méthodes adaptées dans différentes régions du monde. Depuis ce projet, beaucoup d'approches ont été développées. Par exemple, Sun, et al. (2012) ont utilisé le niveau d'eau mesuré par satellite pour ensuite en déduire les débits de la rivière en utilisant un modèle hydraulique couplé à un modèle hydrologique. Le couplage de ces deux modèles permet de décrire la relation entre le niveau d'eau et le débit. D'autres méthodes sont développées comme l'utilisation de réseaux de neurones artificiels [ex. Valizadeh et al., 2017; Dawson et al., 2006], le transfert des débits provenant d'un BV jaugé [ex Zelelew et Alfredsen, 2014; Ergen et Kentel, 2016] ou en utilisant un modèle hydrologique. Cette dernière méthode implique de calibrer les paramètres du modèle hydrologique sans l'utilisation des débits observés. La régionalisation permet de transférer les paramètres du modèle d'un BV jaugé (dit donneur) vers un BV non jaugé (dit receveur). Il existe trois méthodes principales de régionalisation : la méthode de proximité spatiale, de similitude physique et de régression [ex. Oudin et al., 2008; Zhang et Chiew, 2009; Razavi et Coulibaly, 2013].

La méthode de régression consiste à lier directement les caractéristiques physiques du BV (sa superficie, l'utilisation du sol, la topographie, etc...) et les paramètres du modèle hydrologique par des équations de régression. Hundecha et Bárdossy (2004) ont étudié l'impact des changements de l'utilisation du sol sur les débits avec le modèle HBV (*Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning*,

Bergström, 1976). La méthode de régression est utilisée pour fixer les paramètres du modèle sur 95 sous-bassins du BV du Rhin. Swain et Patra (2017) ont eux aussi utilisé cette méthode sur 32 BV en Inde pour estimer les débits en continu avec le modèle SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) développé par USDA-ARS (*Agricultural Research Service of the United States Department of Agriculture*) et *Texas A&M AgriLife Research*.

La méthode de proximité spatiale est basée sur le transfert des paramètres du modèle provenant des BV donneurs voisins. Cette méthode repose sur l'hypothèse que les BV donneurs ont les mêmes comportements hydrologiques que le BV receveur en raison de leur proximité spatiale [ex. Carrillo et al., 2011]. Hernández-Henríquez, et al. (2010) ont utilisé cette méthode pour naturaliser les débits influencés par les barrages présents sur La Grande Rivière au Québec (Canada). Lebecherel et al. (2016) et Perrin, et al. (2003) ont appliqué la même méthode pour calibrer les paramètres du modèle GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journaliers) pour 609 bassins versants localisés en France.

La méthode de similarité physique est basée sur le principe que les BV donneurs ont des caractéristiques physiques et climatiques suffisamment similaires pour supposer qu'ils ont les mêmes comportements hydrologiques que le BV receveur [ex. Parajka, et al., 2005; Bárdossy, 2007; Sisay et al., 2017]. Sisay et al. (2017) ont utilisé des BV donneurs similaires au BV receveur de la ville de Vadodara (Inde) pour calibrer le modèle SWAT. Cette méthode a permis d'analyser l'effet de l'urbanisation sur les débits. Bárdossy (2007) a utilisé la même méthode pour calibrer les paramètres du modèle HBV sur 16 sous-bassins non jaugés localisés en Allemagne. Plusieurs études proposent une liste des caractéristiques à tenir en compte [ex. Peel et al., 2000; Merz et Blöschl, 2004; Young, 2006]. Par exemple, Parajka, et al. (2005) ont utilisé les caractéristiques topographiques, géomorphologiques, géologiques et d'occupation du sol. Razavi et Coulibaly (2013) ont comparé plusieurs études et en ont conclu que les caractéristiques physiques (ex. superficie du BV, élévation et pente moyenne) et climatiques (ex. précipitation moyenne annuelle) sont généralement utilisées.

Plusieurs études ont comparé les trois méthodes de régionalisation. Par exemple, Brunner et al. (2018) ont réalisé la comparaison sur 163 BV en Suisse. Les hydrogrammes ont été construits à l'aide de la méthode du SDHs (*synthetic design hydrographs*, Brunner et al., 2017). La méthode de régression a fourni les résultats les plus satisfaisants.

La méthode de proximité spatiale est apparue comme étant la méthode la plus adaptée par rapport aux deux autres méthodes de régionalisation dans les études de Oudin et al. (2008) et Zhang et Chiew (2009) dont l'objectif était également de comparer les trois méthodes.

Yang et al. (2018) ont testé les trois méthodes sur 118 BV localisés en Norvège, avec une couverture neigeuse importante, en utilisant le modèle WASMOD (*Water And Snow balance MODeling*, Xu, 2003). Pour eux, la méthode de transfert basée sur la similitude physique entre bassins présentait les meilleurs résultats.

Ainsi, selon la littérature, la méthode de régionalisation la plus adaptée dépend de la zone d'étude [Razavi et Coulibaly, 2013] et du choix du modèle hydrologique [Kay et al., 2006]. Ces raisons peuvent expliquer pourquoi les résultats de ces études fournissent des conclusions différentes et appuient l'idée qu'il n'existe pas de méthode universelle.

Pour les raisons susmentionnées et dans un souci de parcimonie, seule la méthode de la similarité physique est utilisée dans cette étude. De plus, il n'y a pas de BV jaugé au voisinage du BV Shipshaw et les caractéristiques physiques sont facilement disponibles.

2.3 Prévisions météorologiques d'ensemble

Le couplage du modèle de réservoir avec le modèle hydrologique représente la dernière étape de construction de l'outil d'aide à la prise de décision. Il faut y intégrer des prévisions météorologiques afin de prévoir les apports futurs aux réservoirs. Or, parmi les principales sources d'incertitudes liées à la prévision de débits, on trouve la prévision météorologique et le modèle hydrologique lui-même (la valeur des paramètres, les conditions initiales et la structure du modèle) [ex. Krzysztofowicz, 2001].

Une des sources d'incertitude liée aux prévisions météorologiques est due aux conditions initiales de l'atmosphère. En effet, au moment de lancer une prévision, on ne connaît pas précisément l'état initial de l'atmosphère. De plus, dans certaines zones, les données observées n'existent que très peu, tout comme les mesures du profil vertical de l'atmosphère. Enfin, au-delà de quelques jours dans le futur, les prévisions météorologiques sont considérées comme peu fiables à la vue du caractère chaotique du comportement de l'atmosphère.

Depuis la dernière décennie, l'utilisation de prévisions météorologiques d'ensemble est devenue plus commune dans plusieurs applications [ex. Cloke et Pappenberger, 2009; Anderson et al., 2002; Bartholmes et Todini, 2005]. Par exemple, Bennett et al. (2014) ont intégré des prévisions météorologiques d'ensemble dans le modèle GR4H (Génie Rural à 4 paramètres Horaire). L'objectif était d'améliorer les prévisions de débits afin d'optimiser l'utilisation de la ressource en eau et d'anticiper les inondations sur le long le terme. L'intégration des prévisions météorologiques d'ensemble a permis de prévoir des débits proches de la réalité, particulièrement sur un horizon de 1 à 6 jours et pour les rivières pérennes. Boucher et al. (2012) ont comparé des prévisions hydrologiques obtenues avec des prévisions météorologiques déterministes, puis d'ensemble, intégrées dans un outil d'aide à la prise de décision, SOHO [Krau, 2005], pour la gestion de six barrages hydro-électriques durant un événement d'inondation, en 2003, sur la rivière Gatineau (Québec, Canada). Les résultats ont montré que les prévisions d'ensemble permettent des scénarios d'opération de gestion performants, mais que le gain le plus important réside dans l'utilisation d'un outil d'aide à la décision comme SOHO par rapport à un mode de prise de décision basé sur le jugement expert.

2.4 Modèle de gestion des réservoirs

La gestion d'un système de réservoirs est soumise à un certain nombre d'objectifs et de contraintes d'intérêts différents (ex. les risques d'inondation, l'optimisation de la production énergétique, etc...). Plusieurs études ont utilisé différentes méthodes en vue d'améliorer l'efficacité de la production énergétique des barrages de manière sécuritaire en utilisant des modèles d'optimisation et/ou des modèles de gestion des réservoirs (voir la section 1.1.2).

Il existe plusieurs méthodes d'optimisation permettant de déterminer les règles de gestion des réservoirs :

- La programmation linéaire est utilisée quand la fonction objective et ses contraintes forment une fonction linéaire [Rani et Moreira, 2010; Alemu et al., 2011]. Par exemple, HEC-ResPRM [USACE 2003] est un modèle d'optimisation à programmation linéaire permettant d'aider le gestionnaire dans la prise de décision. Le modèle recherche le meilleur scénario de gestion en maximisant (ou minimisant) un ensemble d'objectifs sous la forme d'une fonction objective soumise à des contraintes spécifiques.

- La programmation non linéaire existe en raison de la relation complexe existante entre les variables physiques et hydrologiques [ex. GALHAD, Gould et al. 2003; LOQO, Vanderbei 2006].
- La programmation dynamique est utilisée pour des études impliquant des systèmes non linéaires à réservoirs multiples [ex. Zambelli et al., 2006; Kim et al., 2007].

Selon Yeh (1985) le choix de la méthode d'optimisation dépend des objectifs, des contraintes et des caractéristiques physiques des réservoirs.

Les modèles de gestion des réservoirs représentent les caractéristiques physiques des réservoirs et leurs règles d'opération [Babazadeh et al., 2007; Uysal et al. 2016].

Il existe plusieurs modèles de réservoirs, par exemple : Hec-ResSim. MODSIM ou encore RiverWare,

- Hec-ResSim [USACE, 2013]

Ce modèle permet la simulation d'un système de plusieurs réservoirs interconnectés. Son interface graphique se compose de trois modules : configuration du BV, réseau de réservoirs et simulation. Le premier module permet la création des bassins. Le deuxième module permet de construire la rivière, décrire les éléments physiques et opérationnels du système. Le dernier module permet la configuration des simulations du modèle.

- MODSIM [*Modified SIMYLD*, Labadie et al. 2000]

C'est un modèle d'aide à la prise de décision, développé par le DR. John Labadie de l'université du Colorado (États-Unis). Il possède une interface graphique incluant des outils d'importation et d'exportation permettant de le lier avec des systèmes de gestion de base de données externes. Le modèle permet de faire des simulations à court, moyen et long terme.

- RiverWare [Zagona et al. 2001]

Ce modèle permet de faire de la simulation en intégrant diverses caractéristiques et structurelles du BV (générateurs, réservoirs, barrages, etc...). Il peut également intégrer un ensemble de règles d'exploitation. Comme MODSIM, ce modèle peut faire de l'optimisation à court terme à la planification à long terme.

3 MÉTHODOLOGIE

3.1 Reconstitution des apports naturels

3.1.1 Reconstitution par bilan de masse

Dans un premier temps, la reconstitution des apports naturels des réservoirs a été évaluée par un bilan de masse puisque les débits sortants des réservoirs (O) et la variation du volume d'eau dans ces réservoirs (S) sont connus. De fait, les apports naturels sont calculés par l'équation suivante :

$$\frac{I_2 + I_1}{2} = \left(\frac{O_2 + O_1}{2} \right) + \left(\frac{S_2 - S_1}{\Delta_t} \right) \quad (2)$$

Avec I_1 et I_2 les apports naturels au premier et deuxième pas de temps. O_1 et O_2 les débits sortants du réservoir au premier et deuxième pas de temps. S_1 et S_2 la capacité de stockage du réservoir au premier et deuxième pas de temps. Enfin, Δ_t correspond au pas de temps.

La capacité de stockage du réservoir est évaluée en fonction du niveau d'eau dans le réservoir par la courbe d'emménagement.

L'annexe B présente les résultats obtenus pour la période 2006 à 2016 pour tous les sous-bassins.

Malgré la disponibilité des données d'entrées, la variation des apports naturels ne concorde pas avec la variation climatologique saisonnière (ex. la crue printanière). En effet, la complexité de cette méthode réside sur le fait qu'il est difficile d'avoir une bonne estimation de tous les termes du bilan hydrologique.

De fait les apports naturels ont été reconstruits par régionalisation.

3.1.2 Reconstitution par régionalisation

Dans le cas présent, les paramètres du modèle hydrologique peuvent être estimés de deux manières. Certains paramètres peuvent être déduits des informations disponibles du BV à l'étude (ex. le pourcentage de sol imperméable). Les paramètres qui ne peuvent pas être calculés avec les informations disponibles du BV à l'étude (ex. la valeur permettant d'augmenter la température de la couverture neigeuse à 0°C) doivent être calibrés. La calibration des paramètres d'un modèle hydrologique nécessite de connaître les apports naturels. Or, aucune station de mesure de débit naturels n'est disponible dans le BV de la rivière Shipshaw. C'est pourquoi la méthode de

régionalisation par similitude physique est appliquée dans cette étude (section 2.2). Cette méthode permet d'identifier les BV jaugés physiquement similaires (donneurs) aux cinq sous-bassins non jaugés (receveurs) et d'utiliser leurs chroniques de débits pour calibrer les paramètres du modèle hydrologique construit dans HEC-HMS.

Les BV donneurs sont identifiés en comparant leurs caractéristiques physiques avec ceux des cinq sous-bassins receveurs. Ces caractéristiques doivent être considérées comme étant représentatives des processus hydrologiques. Les caractéristiques physiques des sous-bassins receveurs et des BV donneurs sont calculées puis standardisées (calcul de l'écart type de la valeur) pour pouvoir être comparées les unes par rapport aux autres. Le tableau 3 présente la liste des caractéristiques utilisées dans cette étude.

Si un sous-bassin receveur et un BV donneur présentent des caractéristiques physiques similaires alors la distance Euclidienne D est proche de 0 [Kay et al., 2007]. Cette distance est donnée par :

$$D = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=1,N} ((CA_g - CA_{un})W_n)^2} \quad (3)$$

où n est l'un des N bassins versants donneurs. CA_g et CA_{un} (sans unités) sont les valeurs des écarts types de la $n^{ième}$ caractéristique physique du BV donneur et du sous-bassin receveur respectivement. W_n (sans unités) est le poids attribué à la $n^{ième}$ caractéristique physique. Certaines études utilisent un poids constant pour toutes les caractéristiques [ex. Oudin et al., 2008; Parajka, et al., 2005]. D'autres études ont optimisé le poids et ont vu une amélioration des résultats [ex. Oudin et al., 2010; Reichl et al., 2009].

Les poids utilisés dans cette étude ont été fixés grâce à des tests réalisés sur trois BV jaugés considérés comme non jaugés : À l'Ours (35 km²), Bonaventure (1906 km²) et Valin (768 km²). Trois scénarios avec des poids différents sont testés. L'objectif est d'identifier le scénario permettant d'obtenir des débits simulés proches de la réalité. Afin que les trois BV choisis correspondent à un échantillon large, ces BV ont été choisis de manière à avoir :

- Des caractéristiques physiques très différentes (ex. altitude moyenne, coefficient de compacité de Gravelius, densité de drainage, etc...);

- Ils sont séparés d'au moins 200 km les uns des autres (afin que les critères de la région hydrique et de la précipitation annuelle moyenne soient différents pour les trois BV).
- Une chronique de débit d'au moins 20 ans;

Le premier scénario attribue les poids les plus importants aux caractéristiques physiques du BV (ex. la superficie, la pente moyenne). Le deuxième scénario accorde les poids les plus importants aux caractéristiques hydrologiques (ex. ordre du cours d'eau principal, région hydrique). Finalement, le troisième scénario accorde les poids les plus importants aux caractéristiques ayant un impact direct sur la réponse hydrologique d'un BV selon la littérature et nos connaissances [ex. Reichl et al., 2009; Oudin et al., 2010]. Chaque scénario identifie des BV donneurs différents. La liste des poids utilisés pour chaque caractéristique physique utilisée est présentée dans le tableau 3.

Le tableau 4 présente un exemple des indices de performance obtenus pour les trois BV pour les périodes de calibration et validation. Selon les résultats la répartition des poids accordé aux différentes caractéristiques ont un faible impact sur les indices de performances. Cependant, le troisième scénario présente les indices de performance les plus satisfaisants pour l'ensemble des BV. Ainsi, ces tests réalisés sur les trois BV jaugés considérés comme non jaugés ont permis de fixer les poids finaux utilisés dans cette étude (voir le tableau 3).

Les BV donneurs sélectionnés pour chaque BV receveurs (À l'Ours, Bonaventure et Valin), répondent aux critères suivants :

- Ils possèdent une chronique de débit naturels, non influencés par des barrages,
- Ils n'ont pas de données manquantes sur plusieurs mois/années,
- La distance Euclidienne entre le BV donneur et le BV receveur est inférieur à 0.15.

Les résultats ont permis de constater que les BV donneurs du BV non jaugé À l'Ours : Morpions (94 km²), Des Hurons (76 km²) et Boyer (191 km²) possèdent des caractéristiques physiques similaires les uns par rapports aux autres (ex. l'ordre du cours d'eau principal, la densité de drainage et la répartition de l'occupation du sol). Il en va de même pour les BV donneurs du BV Bonaventure : Nouvelle (1 139 km²), Bras-du-Nord (646 km²) et Sainte-Anne (772 km²). Enfin,

malgré que le BV Valin ne présente pas les mêmes caractéristiques physiques que le BV Bonaventure, ils possèdent des BV donneurs similaires : Sainte-Anne, Nouvelle et Matapédia (2753 km²). Cela peut être dû au fait que les deux bassins versants, malgré des caractéristiques différentes, présente une répartition de l'occupation du sol semblable. De plus, rappelons que sur les 106 BV donneurs certains ont des débits influencés par des barrages et d'autres ont des données manquantes sur plusieurs mois ou parfois sur plusieurs années. Ainsi, le nombre de BV donneurs possédant une chronique de débit naturels, non influencés, de plusieurs années est réduit à 61.

L'annexe C présente les caractéristiques physiques des BV donneurs pour ces trois BV receveurs ainsi que la valeur de la distance Euclidienne obtenue pour chaque BV donneurs.

L'annexe D présente les hydrogrammes des cinq sous-bassins et de leurs donneurs individuels.

Tableau 3: Liste et poids des caractéristiques physiques

Caractéristiques physiques	Poids
Région hydrique	0.02
Caractéristiques des dépôts de surface (4 types)	0.03
Superficie du BV Caractéristiques de l'utilisation du sol (5 types)	0.04
Le coefficient de compacité de Gravelius Altitude (moyenne et médiane)	0.06
Précipitations annuelles moyennes Densité de drainage Ordre du cours d'eau principal Superficie recouverte d'eau	0.07
Pentes (moyenne et médiane)	0.08

Tableau 4: Exemple d'indices de performances pour les 3 BV

	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3		
	Calibration	Validation	Calibration	Validation	Calibration	Validation	
NSE	0.5	0.55	0.5	0.53	0.51	0.53	Valin
MAE (m ³ /s)	66.3	58.7	66	58.5	65.8	58.5	
RMSE (m ³ /s)	34.7	22.9	34.4	22.8	34.4	22.8	
NSE	0.8	0.82	0.8	0.82	0.8	0.82	À L'ours
MAE (m ³ /s)	1.1	0.7	1.1	0.7	1.1	0.7	
RMSE (m ³ /s)	0.6	0.2	0.5	0.1	0.6	0.2	
NSE	0.61	0.61	0.61	0.6	0.61	0.6	Bonaventure
MAE (m ³ /s)	35.5	40.1	35.6	39.9	35.5	35.6	
RMSE (m ³ /s)	20.9	21.9	20.7	21.5	20.6	20.7	

3.2 Modèle hydrologique

3.2.1 Présentation du modèle

Le modèle HEC-HMS [USACE 2016], version 4.2.1, est un modèle conceptuel et semi-distribué. Il est développé par l'USACE. Il peut être utilisé pour une simulation continue ou pour un événement seulement. Le modèle est composé de trois modules : la configuration du BV; la météorologie du BV et les paramètres de contrôle de la simulation. La configuration du BV est composée de de plusieurs éléments (ex. jonctions, sources, exutoires, canaux et sous-bassins). Cela permet au modèle d'être flexible et ainsi d'être utilisé dans des contextes variés [ex. Verdhen, et al., 2013; Fazel, et al., 2014; Yasmeeen, et al., 2016; Uysal et al. 2016]. L'élément « sous-bassin » tient compte des apports (par précipitations) et des pertes (par infiltration, par interception des végétaux et par évapotranspiration) ainsi que des transferts souterrains.

L'infiltration de l'eau dans le sol est calculée avec la méthode du SCS-Curve Number (CN, USDA, 1986) qui est simple et rapide. Cette méthode calcule la quantité d'eau précipitée accumulée dans le sol et les plantes avant qu'elle ne soit considérée comme précipitation nette. La part de la précipitation accumulée dans le sol et les plantes est modélisée comme un stockage. Une fois que la précipitation ne peut plus être stockée, l'excès est calculé de la manière suivante :

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad (4)$$

où P_e (en mm) est la précipitation nette, P (en mm) est la précipitation cumulée, I_a (en mm) est la perte initiale et S (en mm) est le potentiel maximum de rétention. I_a et S sont calculés de la manière suivante :

$$I_a = 0.2 S \quad (5)$$

$$S = \frac{(25400 - 254 CN)}{CN} \quad (6)$$

où CN est un indice empirique (sans unités) estimant la perméabilité du sol basé sur l'utilisation du sol (ex. ville, agriculture, forêt, etc...) et la granulométrie des sédiments en surface. Sa valeur minimale est de 30 (représentant un sol perméable) et sa valeur maximale 100 (représentant un sol complètement imperméable).

Les données indiquant la granulométrie des sédiments en surface et l'utilisation du sol sont obtenues par le Ministère des Ressources Naturelles et le Ministère de la Faune Forêt Québec.

La méthode de transformation permet de convertir la précipitation nette en ruissellement. Dans HEC-HMS, l'hydrogramme unitaire pour le ruissellement est estimé avec la méthode du SCS-UH (USDA, 1972). Cette méthode permet d'établir une relation empirique entre la précipitation nette et l'hydrogramme unitaire qui en découle. Elle se base sur la moyenne de nombreux hydrogrammes unitaires obtenus pour différents BV donnant lieu à un hydrogramme sans dimension. Cette méthode calcul le débit maximal (Q_{max} , en m^3/s) en tenant compte du moment où survient le pic de crue (T_p) et de la superficie du BV (S_{BV} en m^2).

$$Q_{max} = 2.08 \times \frac{S_{BV}}{T_p} \quad (7)$$

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + 0.6 \times T_c \quad (8)$$

Cette méthode nécessite de connaître uniquement le temps de concentration du BV (T_c en minutes) et sa superficie.

Le débit de base est calculé avec la méthode de récession exponentielle. Il provient des écoulements souterrains qui peuvent alimenter directement le ruissellement de surface après un événement pluvieux important ou provenant du stockage de plusieurs événements pluvieux antérieurs. Le débit de base (Q_t en m^3/s) à l'instant t est calculé de la manière suivante :

$$Q_t = Q_o \times K \quad (9)$$

où Q_o (en m^3/s) est le débit souterrain à l'instant 0 et K le coefficient de récession (sans unités).

Dans le modèle HEC-HMS, dix paramètres sont nécessaires pour calculer l'accumulation du manteau neigeux et sa fonte. La méthode unique proposée dans le modèle HEC-HMS est une extension de la méthode degrés-jour [ex. Franz, et al., 2008; Hock, 2003]. La fonte de la neige est calculée par un processus de transfert de chaleur entre trois compartiments : la couverture neigeuse, l'air et le sol. Ce transfert est estimé avec les flux entrants et sortants entre chacun de ces compartiments. La température de la couverture neigeuse est basée sur une estimation du transfert de chaleur de la couverture vers le sol et l'air en utilisant l'indice *ATICC* (*Antecedent Temperature Index*). Cet indice est basé sur l'étude d'Anderson (2006). Il est calculé de la manière suivante :

$$ATICC_2 = ATICC_1 + (1 - (1 - C_{ATICC})^{days}) \times (T_a - ATICC_1) \quad (10)$$

où $ATICC_2$ (en $^{\circ}C$ -jour) et $ATICC_1$ (en $^{\circ}C$ -jour) sont des indices, $ATICC$ (en $^{\circ}C$ -jour) pour les pas de temps actuel et précédent respectivement. C_{ATICC} (sans unité) est le poids qui décrit le degré d'importance du $ATICC$ au pas de temps précédent, $days$ est le pas de temps (en jour). T_a (en $^{\circ}C$) est la température à partir de laquelle la précipitation est considérée comme étant de la neige. La couverture neigeuse fond à deux interfaces. À l'interface entre la couverture neigeuse et le sol dans laquelle la fonte de la neige est donnée par une valeur constante. À l'interface entre la couverture

neigeuse et l'atmosphère dans laquelle la fonte de la neige M (mm/jour) est calculée de la manière suivante :

$$M = C_{meltrate}(T_a - T_b) \quad (11)$$

où T_b (en °C) est la température à partir de laquelle la neige fond, $C_{meltrate}$ (en mm/°C-jour) est le coefficient du taux de fonte. Ce dernier peut être calculé différemment en fonction des conditions sèches ou humides. Pour des conditions sèches, ce coefficient est fonction de l'indice de degrés-jour calculé de la manière suivante :

$$ATImelt_2 = (T_a - T_b) + K^{days}(ATImelt_1) \times days \quad (12)$$

où $ATImelt_2$ (en °C-jour) et $ATImelt_1$ (en °C-jour) sont des indices pour les pas de temps actuel et précédent, respectivement. K (sans unité) est le coefficient du taux de fonte.

3.2.2 Choix des indices de performance : NSE, RMSE, MAE

La calibration des paramètres du modèle HEC-HMS est réalisée sur les BV donneurs. Cependant, leurs chroniques de débit observé ne sont pas directement utilisées. En effet, pour que les paramètres du modèle coordonnent avec les caractéristiques physiques des sous-bassins non jaugés de la rivière Shipshaw, la méthode de transposition des débits est appliquée. Ce calcul se fait selon un rapport des aires de drainage (voir l'équation 13, Rouselle et al., 1990; Anctil et al., 2012).

$$Q_1 = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^b \times Q_2 \quad (13)$$

Avec Q_1 (en m³/s) le débit transféré et Q_2 (en m³/s) le débit du BV donneur. A_1 et A_2 (en m²) sont les aires de drainage du BV receveur et donneur, respectivement. b est le facteur de correction régional du rapport des superficies (variant entre 0.6 à 0.9). Ainsi, Q_1 est utilisé pour le calage des paramètres du modèle, comme s'il s'agissait d'une chronique de débit mesurés à l'exutoire du sous BV (qui est en réalité non-jaugé). La comparaison des débits observés du BV donneur avec les débits simulés du modèle hydrologique est évaluée à l'aide de trois indices de performance.

- L'efficacité de Nash-Sutcliffe (sans unité) [Nash et Sutcliffe, 1970] : si les débits simulés sont proches des débits observés, alors le coefficient doit être proche de 1. Cet indice est calculé comme suit :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q})^2} \quad (14)$$

où $Q_{obs,i}$ (en m³/s) est le $i^{ième}$ débit journalier observé. $Q_{sim,i}$ (en m³/s) est le $i^{ième}$ débit journalier simulé \bar{Q} (en m³/s) est le débit observé moyen.

- Les RMSE (*root mean square error*) et le MAE (*mean absolute error*) calculent les différences entre les données observées et simulées dans les unités appropriées. Le MAE somme les erreurs en valeur absolue, divisée par le nombre de valeurs. Le RMSE est la racine carrée de la moyenne des erreurs mises au carré. Dans les deux cas, si les débits simulés sont proches des débits observés alors chacun de ces coefficients doit être proche de 0.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n abs(Q_{obs,i} - Q_{sim,i}) \quad (15)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{n}} \quad (16)$$

Dans les équations (13) et (14), $Q_{obs,i}$ (en m³/s) est le $i^{ième}$ débit journalier observé. $Q_{sim,i}$ (en m³/s) est le $i^{ième}$ débit journalier simulé. n est le nombre total de pas de temps (ici en nombre de jours).

3.3 Modèle de réservoirs

Le BV de la rivière Shipshaw comporte quatre réservoirs. Les deux plus grands réservoirs amont contrôlent le débit de la rivière. Ils représentent 93% de la capacité de stockage du bassin versant. Ainsi, seul ces deux réservoirs sont représentés dans le modèle de réservoir. Les autres ayant une capacité de stockage inférieure à 15 hm³ ne sont pas modélisés dans le modèle de réservoirs. L'eau est transférée du réservoir Onatchiway vers le réservoir Lamothe en passant par un ouvrage de contrôle et un déversoir (figure 2). Ces ouvrages hydrauliques ont été conçus pour permettre une

crue maximale probable de 1010 m³/s et pour atteindre un niveau critique maximal de 307.8 m [SNC Lavalin, 2000].

Les réservoirs Onatchiway et Lamothe permettent la régularisation des apports naturels de la rivière en aval due à leur capacité de stockage (506 hm³ au total) et à leur localisation en amont des trois autres réservoirs. Toute l'année le niveau d'eau maximale est fixé à 303.6 m et à 290.3 m pour Onatchiway et Lamothe respectivement. Ce niveau favorise une hauteur de chute maximale pour la centrale Jim-Gray, située en aval du réservoir Lamothe. Au début du printemps ces deux réservoirs doivent atteindre le niveau minimal d'opération pour accueillir la crue printanière. De la même manière, avant l'automne les niveaux diminuent en prévision d'une crue automnale (fréquente pour ce bassin). Cette gestion permet de produire un maximum d'énergie toute l'année.

Le réservoir Lamothe présente un ouvrage de contrôle, nommé Betsy (figure 2) et une centrale hydro-électrique, nommée Jim-Gray. Une distance de 4 km séparent ces deux ouvrages hydrauliques. L'ouvrage de contrôle est utilisé lorsque la centrale atteint sa capacité maximale d'évacuation (69.6 m³/s) ou en cas de fermeture de cette dernière (ex. pour des réparations). Le débit évacué par cet ouvrage est transféré dans le lac Brochet et ne peut donc pas être turbiné par la centrale Adam Cunningham.

La centrale Jim-Gray possède deux groupes turbines-alternateurs. L'eau passant par cette centrale provient d'une prise d'eau qui se trouve à 1.5 km (figure 2). Ainsi, l'eau est transférée par une galerie d'amenée jusqu'à la centrale.

L'ensemble des caractéristiques physiques des deux réservoirs sont représentées dans le tableau 5.

Le modèle de réservoirs a pour objectif de déterminer les débits sortants et les niveaux des réservoirs en fonction des prévisions des apports naturels. Le modèle nécessite de connaître les caractéristiques physiques des réservoirs et des ouvrages hydrauliques ainsi que leurs règles de gestion.

Un réservoir est représenté par un module « bassin » et un module « barrage ». La capacité de stockage du réservoir est représentée par sa courbe d'emménagement dans le module « bassin ». Les ouvrages de sortie sont représentés dans le module « barrage » par leurs capacités d'évacuation totale en fonction du niveau du réservoir et de l'ouverture des vannes (en ce qui concerne l'ouvrage

de contrôle). La centrale hydro-électrique est représentée par sa capacité à produire de l'énergie en fonction du débit turbiné et par la courbe de rendement des turbines.

Pour fixer les débits sortants des réservoirs, le modèle nécessite une courbe guide (CG). Celle-ci représente l'élévation cible de chaque réservoir en fonction de la période de l'année. Elle doit se situer entre les niveaux minimal et maximal d'exploitation et permettre de produire un maximum d'énergie tout l'année.

Plus les niveaux d'eau du réservoir sont au-dessus de la CG, plus le modèle évacue l'eau pour diminuer le niveau. À l'inverse, plus les niveaux du réservoir sont en-dessous de la CG, plus le modèle conserve l'eau pour rehausser le niveau. Dans cette étude, trois CG ont été proposées pour chaque réservoir, en fonction de trois scénarios : une année sèche, une année humide et une année normale.

Ces courbes ont été proposées en fonction de la gestion des années passées. Dans un premier temps, les niveaux d'eau atteints aux réservoirs Onatchiway et Lamothe ont été triés selon ces trois scénarios. Puis, la CG est définie en calculant la médiane des courbes des trois scénarios individuellement. Utiliser la médiane permet d'éliminer l'effet des événements extrêmes.

Cependant, l'ajout des règles d'opération supplémentaires, comme par exemple pour les centrales hydro-électriques, vient perturber l'objectif du modèle de réservoirs qui est de suivre la CG. En effet, ces règles agissent comme des contraintes à respecter absolument. Le modèle calcule les débits sortants en respectant les règles d'opération dans un premier temps. Puis, dans un deuxième temps, il suit la CG autant que possible.

La règle ajoutée au réservoir Onatchiway permet d'assurer que le niveau maximal atteint ne dépasse pas le noyau étanche du barrage en cas de crue exceptionnelle. Le tableau 6 présente le taux de remplissage en fonction du niveau de la réserve.

La règle ajoutée au réservoir Lamothe prescrit les besoins de production énergétique mensuelle totale.

Les conditions initiales (débits sortants et niveaux des réservoirs au temps 0) sont ajoutées manuellement dans le modèle et sont définies par le logiciel SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). Ce logiciel commercial permet de suivre à distance les niveaux d'eau mesurés

en temps réel par les jauges installées dans tous les réservoirs de la rivière Shipshaw. Les débits sortants des réservoirs sont calculés et transmis par ce logiciel en considérant les variations des niveaux des réservoirs et l'ouverture des vannes.

Tableau 5: Caractéristiques physiques des ouvrages hydrauliques au réservoir Onatchiway (a et b) et au réservoir Lamothe (c et d).

Caractéristiques des réservoirs	Onatchiway	Lamothe
Type d'ouvrage hydraulique	a) Ouvrage de contrôle à 5 vannes b) Déversoir	c) Ouvrage de contrôle à 3 vannes (Betsy) d) Une centrale hydro-électrique (Jim-Gray)
Capacité de stockage (10^6 m^3)	370	136
Longueur de la crête (m)	a) 205 b) 60	c) 40 d) 28.55
Hauteur de l'ouvrage (m)	a) 308.5 b) 303.7	c) 291.2 d) 292.5
Élévation minimale d'opération (m)	294	287.3
Élévation maximale d'opération (m)	307.8	291.8

Tableau 6: Règles relatives au taux maximal de remplissage du réservoir Onatchiway

Zone	Taux maximal de remplissage
294.0 – 300.0 m	300 m^3/s
300.0 – 301.5 m	200 m^3/s
301.5 – 303.2 m	150 m^3/s
303.2 – 303.6 m	100 m^3/s

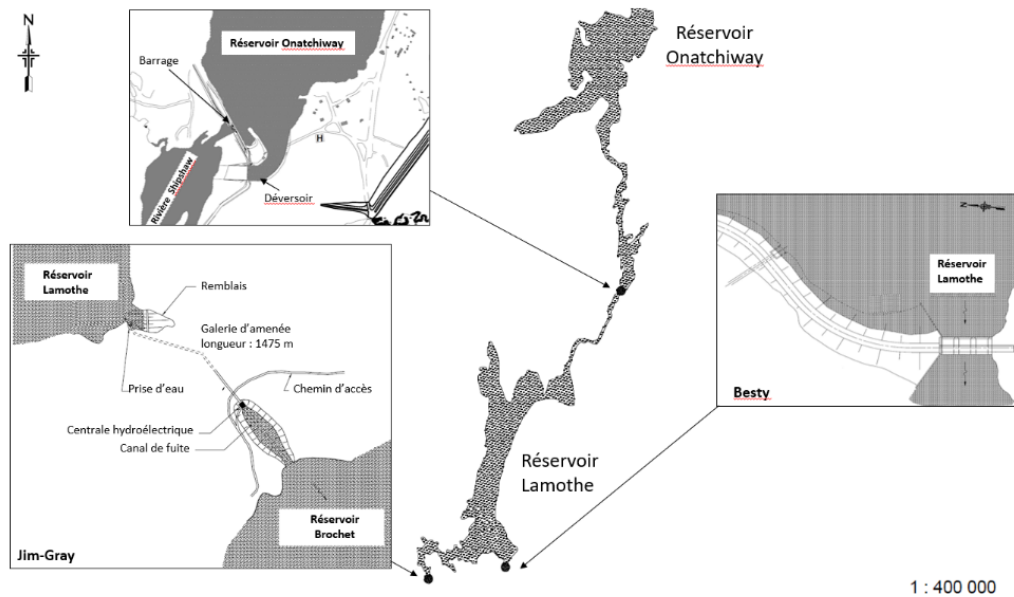


Figure 2 : Schéma des ouvrages hydrauliques à Onatchiway et Lamothe (tiré de SNC Lavalin, 200)

3.4 Le couplage des deux modèles pour l'aide à la décision

Dans cette étude, les modèles HEC-HMS et HEC-ResSim sont utilisés comme un modèle couplé mis en relation avec les prévisions météorologiques d'ensemble (section 2.3), provenant du CMC (le Centre Météorologique Canadien).

Ces prévisions sont archivées dans la base de données TIGGE (*Thorpex Interactive Grand Global Ensemble*), hébergée entre autres par le ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasting). Ces prévisions sont archivées depuis 2008 et couvrent la totalité de la planète.

Les prévisions météorologiques comportent 20 membres. L'horizon est de 10 jours avec un pas de temps de 6h00. Les prévisions peuvent être interpolées sur une grille plus fine lors du téléchargement, au moyen d'une interpolation linéaire entre les points de grille. Ainsi, les grilles utilisées ici ont une résolution spatiale de 0.1 degré (environ 10km). La moyenne de l'ensemble des points grille contenus dans chaque sous-bassin du BV Shipshaw a été calculée pour un pas de temps journalier, et ce pour chaque membre de l'ensemble.

Les données météorologiques ont été téléchargées au format NETCDF (*Network Common Data Form*) sous la forme d'une matrice à quatre dimensions. Ce format a été modifié en format HEC-DSS de manière à être intégré dans le modèle hydrologique.

Comme la plupart des modèles hydrologiques, HEC-HMS n'a pas été développé pour intégrer des prévisions météorologiques d'ensemble. Ainsi, afin de forcer le modèle à intégrer les 20 membres des prévisions d'ensemble, un script matlab permet de modifier de manière automatique les dates de début et de fin des simulations ainsi que les données climatiques brutes des fichiers textes spécifiques au modèle (ex. les extensions «.gage » et « .hms »).

Une autre version de modèle, HEC-RTS (Real-Time Simulation program, USACE 2017), permet également de représenter un outil d'aide à la prise de décision pour la gestion de barrage hydro-électrique. Ce modèle, permet de coupler des données de prévisions avec HEC-HSM et HEC-ResSim. Cependant, due à la récente disponibilité du modèle, la combinaison du modèle HEC-HMS et HEC-ResSim a été utilisé dans cette étude.

Afin d'analyser si le couplage des deux modèles est adapté à tous types d'événements météorologiques trois saisons de trois années différentes ont été analysées :

- L'automne 2010 : L'automne correspond à la deuxième période de l'année durant laquelle il y a des crues qui sont dues aux précipitations. L'année 2010 correspond à une année sèche, dans laquelle les précipitations sont plus faibles que la normale.
- Le printemps 2013 : Le printemps correspond à la première période de l'année où les crues sont les plus importantes. Elles sont dues principalement à la fonte de la neige. L'année 2013 correspond à une année normale, durant laquelle les précipitations n'ont pas été plus importantes ou plus faibles que la normale.
- L'été 2015 : L'été correspond à une période durant laquelle les précipitations peuvent être importantes. L'année 2015 correspond à une année humide, durant laquelle les précipitations ont été plus importantes que la normale.

Enfin, les prévisions d'ensemble de débits produites par le modèle hydrologique construit dans HEC-HMS sont intégrées dans le modèle de réservoirs (HEC-ResSim). La figure 3 représente le schéma du système complet d'aide à la prise de décision.

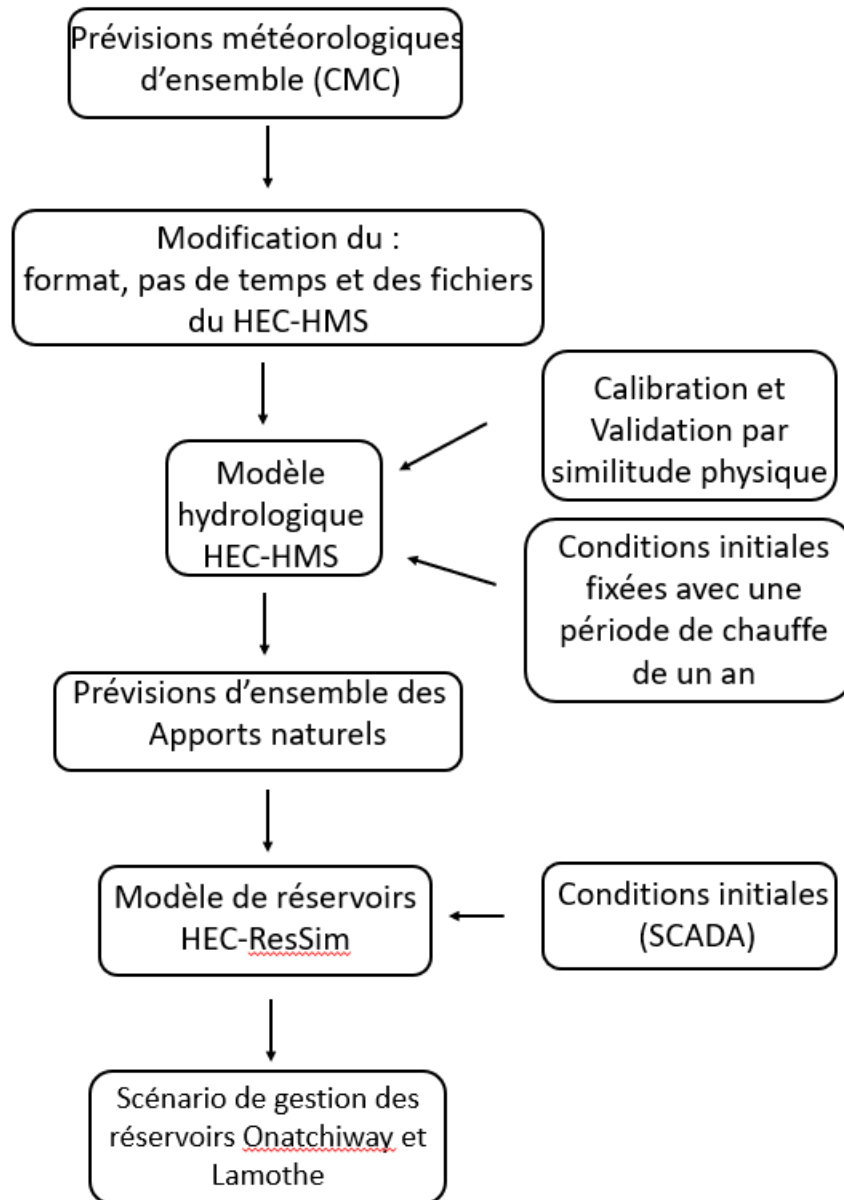


Figure 3 : Schéma du système du modèle d'aide à la prise de décision

Le chapitre suivant est constitué d'un article scientifique qui a été soumis pour publication dans le Canadian Water Resources Journal le 19 novembre 2019. L'article renferme tous les résultats obtenus dans le cadre de cette maîtrise.

4 ARTICLE SCIENTIFIQUE

Auteurs et affiliation :

E. Reig: étudiante en maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil et de génie du bâtiment.

M-A. Boucher : professeure, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil et de génie du bâtiment.

E. Tremblay : Produits Forestiers Résolu, Hydro-Saguenay.

Date de soumission : 19 novembre 2019

État d'acceptation : Corrections soumises le 18 mai 2020

Revue : *Canadian Water Resources Journal*

Titre français : Préviation hydrologique d'ensemble pour la gestion des réservoirs de la rivière Shipshaw.

Contribution au document :

Cet article contribue au mémoire en énonçant les résultats obtenus par l'outil d'aide à la prise de décision, développé dans le cadre de ce projet de maîtrise, en considérant la préviation météorologique d'ensemble de trois périodes (automne 2010, printemps 2013 et été 2015).

Résumé français :

Plusieurs sociétés propriétaires de centrales hydroélectriques basent la gestion de leurs barrages sur l'expérience du gestionnaire. Dans le cadre de cette étude, un système de préviation d'ensemble du débit de la rivière Shipshaw (Québec, Canada) a été développé et couplé à un modèle de réservoir. L'objectif de cette étude était de vérifier l'hypothèse selon laquelle un tel outil d'aide à la prise de décision (couplage du système de préviation hydrologique d'ensemble avec un modèle de réservoir) permettrait à la fois de mieux satisfaire les règles de gestion des réservoirs et de produire plus d'énergie qu'un mode de décision basé sur l'expérience du gestionnaire. Pour pallier au fait que la rivière Shipshaw est non jaugée, une méthode de régionalisation basée sur la similitude physique a été utilisée pour calibrer le modèle hydrologique HEC-HMS. Une fois le modèle hydrologique calibré, il a été alimenté par des préviation météorologiques d'ensemble d'Environnement et changement climatique Canada (ECCC). Ces préviation sont constituées de

20 membres, avec un horizon de 10 jours et un pas de temps de 6 heures. Les résultats obtenus valident l'hypothèse de départ : l'utilisation du système d'aide à la décision proposé ici aurait pu aider à éviter des inondations passées et augmenter la production énergétique. Globalement, cet outil peut permettre au gestionnaire l'anticipation d'événements à une plus longue échéance que lorsque la gestion est uniquement basée sur l'expérience. Enfin, la simplicité et la flexibilité de ces deux modèles (HEC-HMS et HEC-ResSim) les rend facilement transférables à d'autres contextes opérationnels où les prévisions sont nécessaires pour compléter la connaissance des experts.

4.1 Abstract

Many hydropower companies continue to rely on expert judgment to manage the operations of their reservoirs. Decision-support systems, composed of a hydrological forecasting system and a reservoir model, can ensure that reservoir operation objectives are attained more effectively than by relying solely on expert judgment. In this study, a simple ensemble inflow forecasting system coupled with a reservoir model is developed and the proposed model-based operational water management decisions are compared with those based on expert judgment for the Shipshaw River in Quebec, Canada. Given that no natural streamflow records are available for the Shipshaw River, the HEC-HMS hydrological model is calibrated using a regionalization method based on physical similarity. The calibrated hydrological model is fed by ensemble meteorological forecasts that include 20 members, with a 10-day horizon and a 6-hour time step. The proposed decision-support system can help avoid small flooding events while potentially improving energy production by 2 to 60% for this case study. The proposed forecasting system also allows water-resource managers to anticipate events with a greater lead time.

4.2 Introduction

Reservoir management is challenging as it involves monitoring several variables (e.g., energy requirements, inflows to the reservoir, and storage volume) to calculate water release from a reservoir. In the context of hydropower production, an important goal is to maximize profits, yet water release decisions must also aim to maximize water storage (i.e., keep the water head high while avoiding spilling, flooding or any threat to dam integrity).

Many operational agencies still rely on expert judgment for reservoir management (e.g., Taylor et al. 2015; Ahmed and Mays 2013). Decision-making is therefore subjective and highly dependent on the level of experience of the expert (e.g., Pagano et al. 2016; Fallah-Mehdipour, Hadda, and Mariño 2013). Experience is built on past hydrometeorological observations and events; hence, water management based on expert judgment relies implicitly on stationarity. Climate change, however, induces further uncertainties related to precipitation, groundwater recharge, runoff, and snowmelt (e.g., Gaudard, Gili, and Romerio 2013) with consequences for water management (e.g., Bongio, Avanzi and De Michele 2016; Finger et al. 2015; Golombek, Kittelsen, and Haddeland 2012). For instance, Barnett, Adam, and Lettenmaier (2005) indicated that in snow-dominated regions, warming will cause an earlier spring freshet as warming in Canada will be greatest in winter and spring (Hengeveld, Whitewood, and Fergusson 2005). Snow precipitation patterns are also becoming modified as snowfall is increasing in Northern Canada but decreasing in the southern regions (e.g., Mekis and Vincent 2011; Zhang et al. 2000).

Various optimization or reservoir models have been developed to improve reservoir management and increase hydropower production in a safe manner (e.g., Rani and Moreira 2010; Alemu et al. 2011). Optimization methods define reservoir operation policy through linear or nonlinear algorithms with an objective function. Yeh (1985) concluded from a review of existing approaches that the optimal method depended on reservoirs' characteristics, available data, and the specified constraints and objectives. Labadie (2004) reviewed optimal operations of multi-reservoir systems and demonstrated that reservoir models can improve the efficacy of these river-reservoir systems. Reservoir models replicate river-reservoir systems to optimize their use based on a reservoir's physical characteristics and operating rules. Babazadeh et al. (2007), for example, used the HEC-ResSim reservoir model (Reservoir System Simulation, USACE 2013) to evaluate the performance

of the Jiroft Dam (Iran) given scenarios of sedimentation, project expansion, and greater hydropower plant efficiency.

Other studies have based reservoir management on the use of a coupled hydrological and reservoir model implemented using future meteorological data (e.g., Lim, Hassell, and Teng 2010; Ahn, Lee, and Kang 2014; Uysal et al. 2016). Hydrological forecasting often relies on ensemble meteorological forecasts (Anderson et al. 2002; Bartholmes and Todini 2005; Cloke and Pappenberger 2009) to quantify uncertainties stemming from meteorological models and the initial atmospheric conditions (Krzysztofowicz 2001). Meteorological forecasts are powerful tools for water management (e.g., Che and Mays 2015; Hewitt, Buontempo, and Newton 2013). Uysal et al. (2016) used meteorological forecasts as inputs to hydrological and reservoir models (HEC-HMS and HEC-ResSim) for real time streamflow forecasting for the Yuvacik Reservoir in Turkey.

The hydrological component of these models requires valid estimates of natural streamflow records. In ungauged catchments lacking this information, there are several methods for estimating streamflow. Regionalization methods are particularly applicable. Regionalization refers to the transfer of hydrological model parameters from a gauged catchment (donor) to an ungauged catchment. The three most common variants of this method are statistical regression (e.g., Abdulla and Lettenmair 1997; Hindecha and Bárdossy 2004; Swain and Patra 2017; Razavi and Coulibaly 2017), transfer according to spatial proximity (e.g., Carrillo et al. 2011; Hernández-Henríquez, Mlynowski, and Déry 2010), and transfer according to physical similarity (e.g., Oudin et al. 2008; Zhang and Chiew 2009; Razavi and Coulibaly 2013).

In the current study, neighbouring catchments are ungauged although the catchments' attributes are easily available. This transfer method assumes that homogeneous catchments—sharing similar physical attributes—have approximately the same general hydrological behaviour and produce similar streamflow responses. This approach has been used widely; for instance, Sisay et al. (2017) used donor catchments based on physical similarity to calibrate a SWAT model for studying the effect of urbanization on the hydrological processes of the ungauged catchment of Vadodara (India). Bárdossy (2007) also successfully used this method to calibrate an HBV model for 16 ungauged sub-catchments in the German portion of the Rhine River.

A simplified representation of the system using an optimization tool or a hydrological model coupled with a reservoir model can be applied to adapt reservoir management to climate change (e.g., Bongio, Avanzi and De Michele 2016; Gaudard et al. 2016; Minville et al. 2009). Maran, Volonterio, and Gaudard (2014) used a simple optimization tool, SOLARIS (Maran et al. 2006), to simulate reservoir management under a changing climate. Payne et al. (2004) also demonstrated that reservoir management on the Columbia River is improved by adapting reservoir filling dates and energy requirement constraints to climate change via use of three ensemble meteorological forecast scenarios from the National Center for Atmospheric Research Parallel Climate Model of the US Department of Energy. These scenarios were used as inputs of the Variable Infiltration Capacity (VIC) hydrological model (Liang et al. 1994).

Resolute Forest Products (RFP) owns four hydropower plants on the Shipshaw River (Saguenay–Lac-Saint-Jean, Canada) for powering their nearby pulp and paper factories. Managing these reservoirs is challenging because of multiple objectives and constraints that include evaluating flood risks, optimizing energy production, ensuring reservoir security, and protecting aquatic life. Use of a decision-support system consisting of ensemble hydrological forecasts and a reservoir model can, however, (1) formalize (even conceptually) hydrological processes within the catchment, (2) formalize the decision process, and (3) anticipate hydrological events with a longer lead time than human expertise would typically provide. Decision-support systems, therefore, can be effective tools for water managers. This study aims to develop a simple ensemble inflow forecasting system for the ungauged Shipshaw River and implement a reservoir model that can be used with these ensemble forecasts to assist dam management. From this developed model, the study aimed to test the following hypotheses 1) “The decision-support support system improves the capacity to anticipate hydrological events better than expert judgment”, and 2) “A decision-support system satisfies operation policies better than expert judgment alone.”

4.3 Study area

The Shipshaw River is a tributary of the Saguenay River in Quebec, Canada (Figure 4). It has its source in the Pamouscachiou Reservoir. Four hydropower plants are installed along the river and are managed by RFP: the Jim-Gray, Adam Cunningham, Chute-aux-Galets, and Murdock-Wilson dams. The Shipshaw River system accounts for 82%–85% of RFP’s total installed power capacity,

the remaining coming from plants located on the Chicoutimi and Aux Sables rivers. Mean annual precipitation is 1019 mm and the mean annual streamflow for the Onatchiway sub-catchment is estimated at 45.56 m³/s, based on reconstituted inflows. The hydrological regime is defined by three main seasons: November 30–March 31 is the approximate winter season, spring freshet occurs normally from April 1 to May 31, and summer-fall lasts from June 1 to November 29.

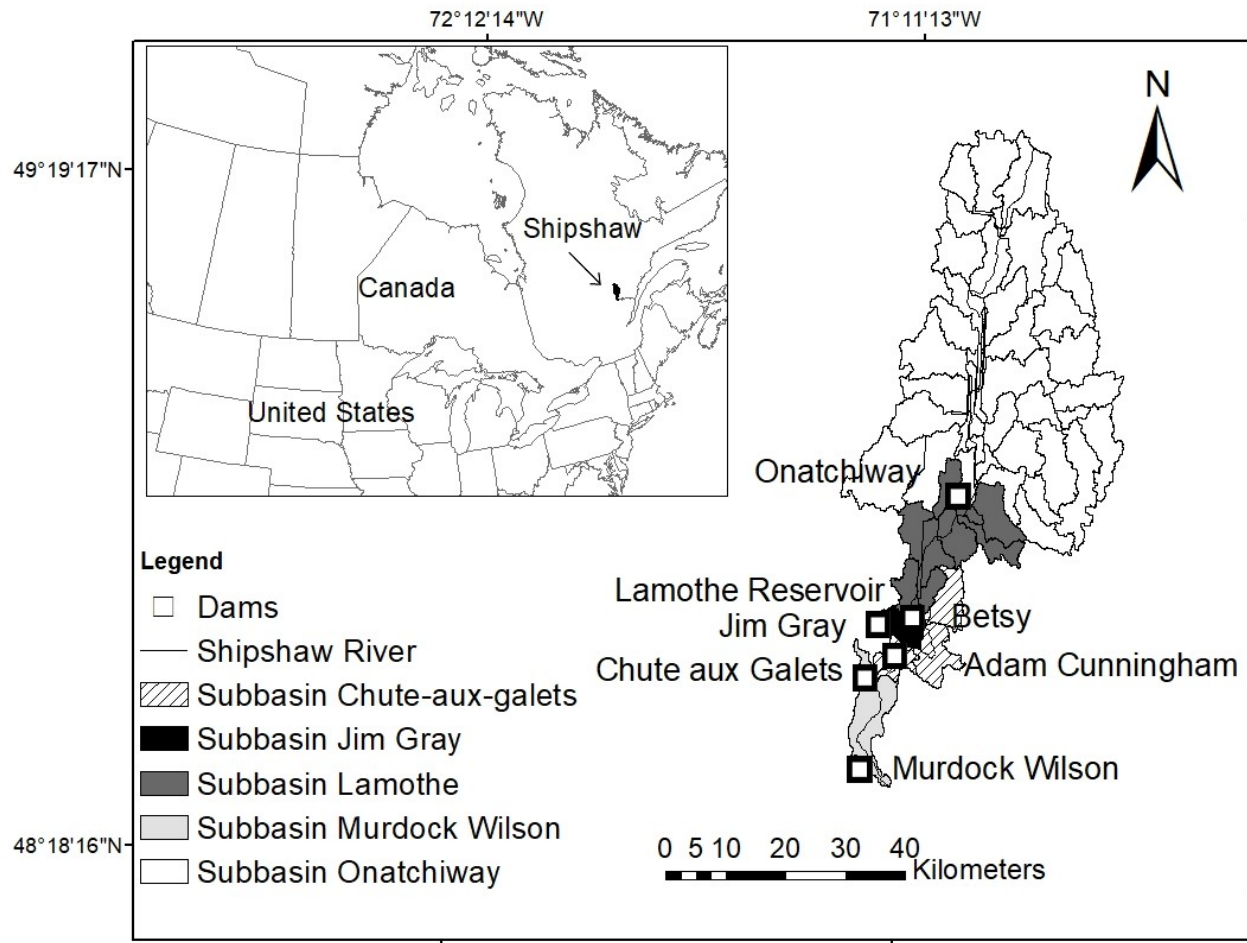


Figure 4: Localisation of the Shipshaw River catchment

The 2 270 km² catchment is divided into five sub-catchments based on the location of the hydraulic structures. The two northernmost reservoirs, Onatchiway and Lamothe, control the streamflow of the river with their joint 506 hm³ holding capacity. The southernmost sub-catchment, Murdock-Wilson, holds the smallest reservoir (1.96 hm³).

The population density of this area is low and is concentrated mainly in the southern portion of the catchment. The remaining catchment is forested, mainly with resinous and deciduous trees, except

for the Murdock-Wilson sub-catchment, which is covered mostly by agricultural land. This latter sub-catchment is the flattest of all sub-catchments. The Shipshaw River catchment varies in elevation from 7 to 834 m asl (mean 470 m asl) with a mean slope of 5.5°. Till covers most of the catchment surface.

4.4 Methodology

4.4.1 The HEC-HMS hydrological model

The Shipshaw River catchment is modelled using the HEC-HMS software, version 4.2.1, developed by the US Army Corps of Engineers. It is a conceptual, semi-distributed hydrological model that has been used extensively in simulation and streamflow forecasting studies (e.g., Verdhen, Chalar, and Sharma 2013; Fazel, Scharffenberg, and Bombardelli 2014; Yasmeeen, Zaidi, and Afzaal 2016; Uysal et al. 2016). This model was selected due to operational preoccupations, as RFP are expected to use our model for day-to-day operations upon completion of the study; as first-time users of a hydrological model, it was important for users to have a graphic user interface. In HEC-HMS, the infiltration capacity is estimated using the SCS-Curve Number method (CN, USDA 1986), and the total streamflow computation is based on the SCS-Unit Hydrograph (SCS-UH) method (USDA 1972).

The recession-constant method (Chow, Maidment, and Mays 1988) was used to compute groundwater contribution to the streamflow:

$$Q_t = Q_o k^t, \quad (17)$$

where Q_t is the baseflow (m^3/s), Q_o is the initial streamflow (m^3/s), and k is the ratio of the baseflow at time t (in sec) to the baseflow one day earlier.

For snowmelt, an extension of the degree-day approach (e.g., Franz, Hogue, and Sorooshian 2008; Hock 2003) was used. Snowmelt is calculated by a heat transfer process between the snowpack, the surrounding air, and the ground using the incoming and outgoing energy fluxes between these three components. Snowpack temperature is estimated using the antecedent temperature index (*ATICC*) of Anderson (2006) and is computed as:

$$ATICC_2 = ATICC_1 + (1 - (1 - C_{ATICC})^{days}) \times (T_{avg} - ATICC_1), \quad (18)$$

where $ATICC_2$ is the ATICC of the current time step and $ATICC_1$ is for the previous time step. C_{ATICC} is a weight that describes the degree of importance of the earlier estimates of $ATICC$ for the computation of the current value and $days$ is the time step. The snowpack melts at two interfaces. At the snow-ground interface, snowmelt is given a constant value. At the snow-air interface, snowmelt (Sm) is computed as:

$$Sm = C_{meltrate}(T_{avg} - T_b), \quad (19)$$

where $C_{meltRate}$ is the melt rate coefficient and T_b is the baseline temperature above which snow melts (here 0 degree Celsius). Different values are used for dry or rainy conditions. $C_{meltRate}$ for dry conditions is a function of a degree-day index and is given by:

$$C_{meltRate2} = (T_{avg} - T_b) + K^{days}(AC_{meltRate1}) \times days, \quad (20)$$

where $C_{meltRate2}$ is the degree-day index at the current time step, and $C_{meltRate1}$ is the degree-day index at the previous time step. K is the melt rate coefficient (fixed during calibration). The $C_{meltRate}$ for rainy conditions is computed as follows:

$$C_{meltrate} = R_{meltrate} + 0.007P, \quad (21)$$

where $R_{meltRate}$ is the wet melt rate (in mm/°C-day), and P is the precipitation (in mm/day).

Surface runoff is generated using the water balance that is computed over each sub-catchment using the model components detailed above, and the synthetic unit hydrograph from the Soil Conservation Service (USDA 1972)

4.4.2 Natural streamflow reconstruction

While some of the hydrological model's parameters can be estimated from available information (e.g., the percentage of impervious surface on the catchment), other parameters are non-measurable (e.g., the amount of liquid water content required for the snowpack to be considered ripe). All model parameters are provided in the appendix. Due to the lack of observed streamflow series,

direct hydrological parameter calibration is impossible. Hence, the physical similarity method was used between each sub-catchment of the Shipshaw River and the donor catchments.

First, potential donor catchments and all ungauged sub-catchments of the Shipshaw River were characterized based on 20 attributes that characterize the hydrological response of a catchment (e.g., Peel et al. 2000; Merz and Blöschl 2004; Young 2006). Parajka, Merz, and Blöschl (2005) used topography, geomorphology, geology, precipitation, and land use as attributes. Razavi and Coulibaly (2013) compared several studies and concluded that physiographic attributes (e.g., elevation, area, slope) and climatic attributes (e.g., mean daily temperature or mean annual precipitation) are generally used. The 20 selected attributes for this study (Table 7) were based on their availability and representativeness to the hydrological response of the Shipshaw River catchment.

A Euclidean distance was applied to evaluate the similarity between the attributes of potential donor catchments and the Shipshaw sub-catchments (Kay et al. 2007). The Euclidean distance (D) is given by:

$$D = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=1, N} \left((CA_g - CA_{un}) W_n \right)^2}, \quad (22)$$

where n indicates one of N catchment attributes, CA_g and CA_{un} are the standard deviation values of the n^{th} catchment attribute for the donor catchment and the ungauged sub-catchment, respectively, and W_n is the weight of the n^{th} attribute. Regarding the standard deviation, note that it is computed using the data base for all donor catchments. For instance, the standard deviation for the attribute ``basin area`` is computed using the area for all donor catchments. A lower Euclidean distance indicates a greater similarity between two catchments. Generally, all attributes are given equal weight (e.g., Oudin et al. 2008; Parajka, Merz, and Blöschl 2005). In this study, however, different weights were used to emphasize the relative importance of each attribute based on preliminary tests performed on three gauged catchments and on our understanding of the dominant hydrological processes within the Shipshaw River catchment, following Oudin et al. (2010) and Reichl et al. (2009). Table 7 presents the final weights used in this study.

Table 7: Applied weights to catchment attributes

Catchment attributes		Weight
id	Name	
1	Hydrographic region	0.02
2-5	Soil characteristics (4 types)	0.03 (each)
6	Catchment area	0.04
7-11	Land-use characteristics (5 types)	0.04 (each)
12	The Gravelius compactness coefficient	0.06
13-14	Catchment altitude (mean and median)	0.06
15	Mean annual precipitation	0.07
16	Drainage density	0.07
17	Strahler number of the main river	0.07
18	Fraction of water cover (river/reservoir)	0.07
19-20	Catchment slope (mean and median)	0.08

Additional criteria were also considered: that 1) donor catchments had at least 20 years of observed streamflow; 2) although similar to the ungauged sub-catchment, donor catchments can still differ (20-25%) from the sub-catchment in terms of physical characteristics. The goal was to cover uncertainty regarding the (partly subjective) evaluation of physical similarity; and 3) donor catchments are separated from one another by at least 200 km.

4.5 Hydrometeorological data

4.5.1 Presentation

The joint use of several similar donor catchments is recommended (e.g., Arsenault and Brissette 2014; Oudin et al. 2008; Zhang and Chiew 2009). As such, from the 106 potential gauged donor catchments, 15 catchments having a distance D of <0.2 (Oudin et al. 2008) were selected for the five ungauged sub-catchments of the Shipshaw River (three donor catchments per sub-catchment).

As the regionalization method used in this study required daily streamflow data from donor catchments, 106 potential donor catchments were selected, all located in Quebec. Streamflow time series for these donor catchments are publicly available from the Quebec government website of the Direction de l'Expertise Hydrique et Atmosphérique, a division of the Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC).

Meteorological observations are also available since the 1960s from the MELCC in the form of gridded ($10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$) daily total precipitation and maximum and minimum air temperatures. Those grids are produced by kriging data collected from ground stations to a regular grid (Bergeron 2015). For the purpose of this study, the grids for the period 1965-2015 were used.

Ensemble meteorological forecasts were retrieved from Environment and Climate Change Canada (precipitation, maximum and minimum temperatures) from the TIGGE (THORPEX Interactive Grand Global Ensemble) database maintained by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). These forecasts include 20 members and cover a 10-day horizon with a 6-h time step. Those grids are available with an original 0.5° horizontal resolution (N200 Gaussian grid) and they were downscaled to a 0.1° resolution using bilinear interpolation during data retrieval.

Evapotranspiration is calculated using equation (23) as proposed by Oudin (2004), using both observed and forecasted temperatures.

$$PET = R \times \frac{T_{avg} + 5}{100\rho(2.501 - 2.361 \times 0.003 \times T_{avg})} \quad (23)$$

In this equation, T_{avg} is the mean daily air temperature ($^{\circ}\text{C}$), ρ is the volumic mass of water (taken as 1000 kg/m^3), and R is the extraterrestrial solar radiation in $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$, estimated using the date of any given day and the latitude of the point of interest.

4.5.2 Calibration

The hydrological parameters were first calibrated for the three donor catchments of each ungauged sub-catchment. To obtain a single parameter value for each sub-catchment, the parameters obtained from the three donor catchments were averaged (Oudin et al. 2008). Although the HEC-HMS has an optimization tool, calibration is largely manual. Our optimization of model parameters was based mostly on the maximization of the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE; Nash and Sutcliffe 1970), although the root mean squared error (RMSE) and the mean absolute error (MAE) were also used as verification tools. The efficacy of this calibration method was tested using three gauged catchments (à l'Ours, Bonaventure, and Valin rivers) to confirm that the transferred parameters used with the HEC-HMS satisfactorily reproduced the observed streamflow, before being applied to the sub-catchments of the Shipshaw River. Table 8 presents the details of the data that was used for the calibration of each sub-catchment of the Shipshaw River. The donor catchments are identified on Figure 5.

Table 8: characteristics of the donor catchments used for the sub-catchement of the Shipshaw River

Sub-catchment	Donor catchment	Calibration period	Validation period
Onatchiway	Famine	1965-1991	1992-2015
	Ouelle	1983-1999	2000-2015
	Picanoc	2004-2011	2012-2015
Lamothe	Désert	2006-2011	2012-2015
	Du Moine	1966-1991	1992-2015
	Picanoc	2004-2011	2012-2015
Adam Cunningham	Désert	2006-2011	2012-2015
	Du Moine	1966-1991	1992-2015
	Kinojevis	1961-1993	1994-2015
Chute-aux- Galets	Désert	2006-2011	2012-2015
	Du Moine	1966-1991	1992-2015
	Picanoc	2004-2011	2012-2015
Murdock Wilson	Etchemin	1981-1998	1999-2015
	Famine	1965-1991	1992-2015
	Ouelle	1983-1999	2000-2015

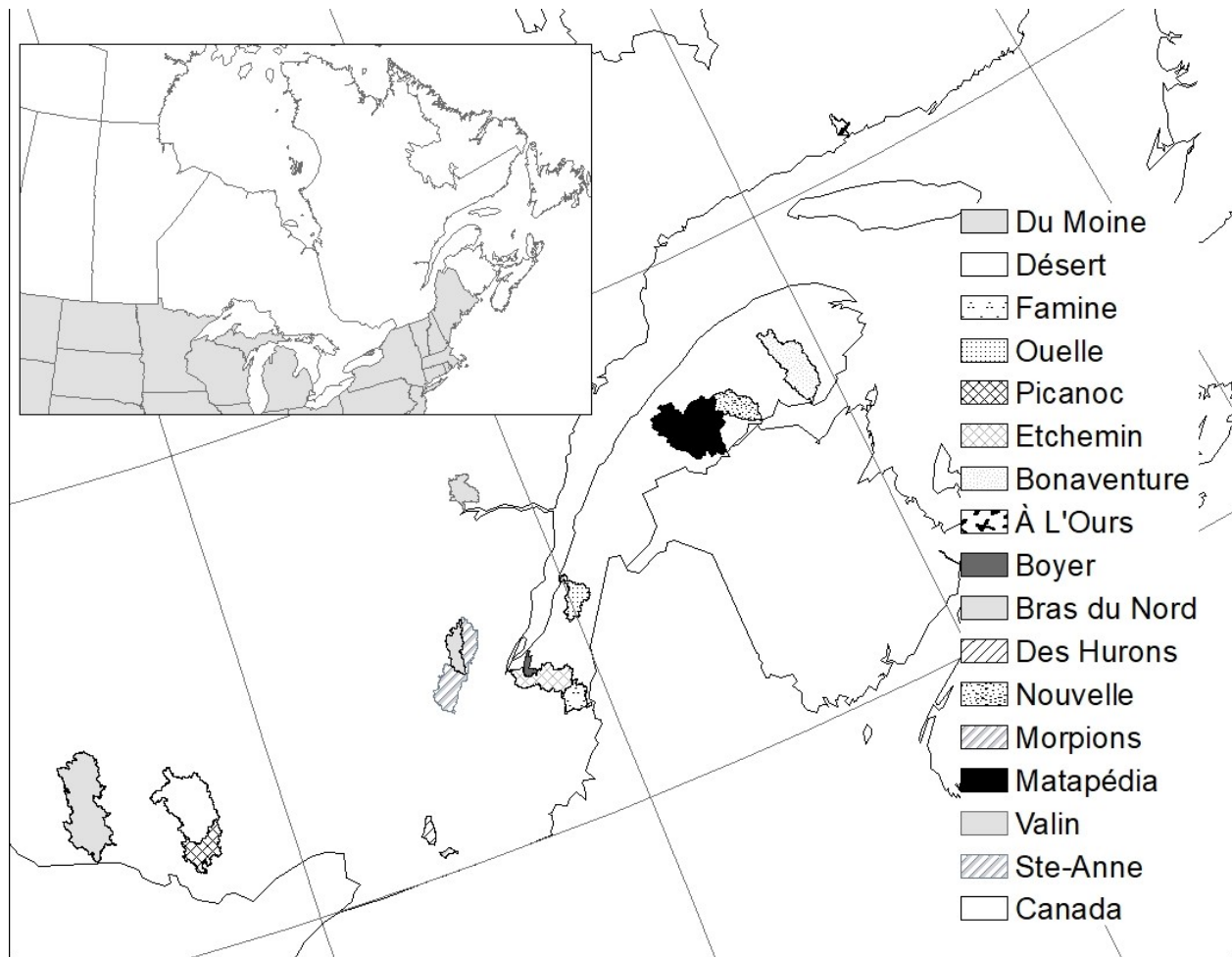


Figure 5: Localisation of the donor catchments

When used in forecasting mode, a one-year warm up period is first ran before forcing the model with each ensemble member from the meteorological forecasts.

4.6 ResSim reservoir model

4.6.1 Presentation

The HEC-ResSim model version 3.1, developed by the USACE (USACE 2016), simulates reservoir operations based on various inflow scenarios, operating constraints, and rule curves. This model has been used extensively in water management studies (e.g., Babazadeh et al. 2007; Uysal et al. 2016). The model has three modules. First, the catchment is represented as a network of different elements created in the “watershed module.” Junctions represent the delimitation of hydraulic structures (e.g., the upstream point of a reservoir). The river network is represented by routing reaches, and each reservoir is represented by a combination of a pool and one of several dam types. HEC-ResSim requires inflow data as input at junction points upstream of each reservoir. Streamflow routing is performed using the Muskingum method (USACE 2016) within the “reservoir network module.” In this second module, the physical descriptors of each pool and dam as well as the allowed range of water release must all be provided. Rules restrict this range and the model computes the final water release decision using the “simulation module.”

4.6.2 Structure of the reservoir model

As the Onatchiway and Lamothe reservoirs together represent 93% of the total holding capacity of the Shipshaw River and regulate the river’s streamflow, only these two main reservoirs were considered for our model. Water is transferred downstream from Onatchiway to Lamothe by a spillway (having five gates) and an overflow dam (Figure 6).

Prior to the spring freshet, reservoir levels are lowered as close as possible to the minimum level (287.3 m and 295 m for the Lamothe and Onatchiway reservoirs, respectively). The main outlet of the Lamothe Reservoir is the Jim-Gray hydropower plant (Figure 6), containing two turbine-generator groups. The three-gated spillway is located 4 km downstream of the plant.

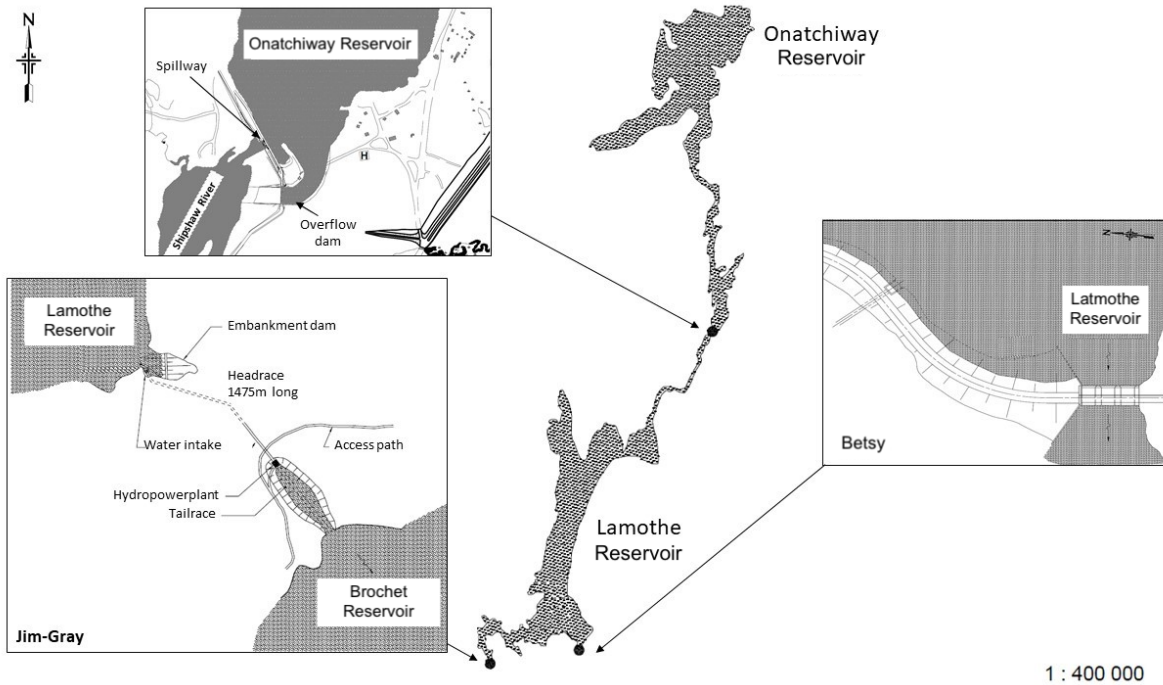


Figure 6: Schematic representation of hydraulic structures outlet at Onatchiway and Lamothe reservoirs (modified from SNC Lavalin 2000)

The reservoir model is used to determine water release dependent on future inflow. The related decision logic is based on the physical characteristics of the reservoirs and operation policy. Each reservoir is characterized by an elevation–storage area table. The dam’s hydraulic behaviour depends on the type of outlet, and both uncontrolled and controlled outlets are characterized by an elevation curve. The main difference with a hydropower plant outlet lies in energy production, which must be computed by the model, thus requiring a capacity and an efficiency table. Table 9 presents the physical characteristics of the Onatchiway and Lamothe reservoirs, including elevation and storage values. Three types of operation policies were considered in the model:

- Water release decision logic depends on a guide curve (GC), which determines the target elevation of the reservoirs over time. Here, three different GC were considered, depending on long-term meteorological conditions: dry, normal, and wet years. The final water release prescribed by the model is the value that best meets the goal of returning the pool to the desired GC elevation with respect to rule restrictions.

- A rule prescribing the maximum filling rate is included for the Onatchiway Reservoir. The goal is to ensure that the maximum water level always remains below the critical maximum. Table 10 presents this rate depending on the reservoir elevation.
- The monthly energy production requirements, the “hydropower schedule,” are identified as a rule for the Lamothe Reservoir.

Table 9: Physical characteristics of the Onatchiway and Lamothe reservoirs

Reservoir characteristics	Onatchiway	Lamothe
Type of outlet(s)	a) A spillway with five gates	a) A spillway with three gates
	b) An overflow dam	b) A hydropower plant
Reservoir capacity (10^6 m^3)	370	136
Crest length (m)	a) 205	a) 40
	b) 60	b) 28.55
Elevation at the top of dam (m)	a) 308.5	a) 291.2
	b) 303.7	b) 292.5
Minimum operation elevation (m)	294	287.3
Maximum operation elevation (m)	307.8	291.8

To obtain outflow forecasts in real time, each inflow forecast scenario must be provided to the reservoir model. Initial conditions are defined using data acquired in real time through a supervisory control and data acquisition (SCADA) system. It provides reservoir elevations transmitted from automatic gauges located in the reservoirs and outflow computed from variations in reservoir elevation.

Table 10: The maximum filling rate rule

Zone (elevation)	Maximal filling rate rule for Onatchiway reservoir (m³/s)
294.0–300.0 m	300
300.0–301.5 m	200
301.5–303.2 m	150
303.2–303.6 m	100

4.7 The decision-support system and its evaluation

4.7.1 Presentation

A decision-support model must be simple to implement by the decision maker; therefore, a utility program was used so that the model automatically generates inflow ensemble forecasts for each sub-catchment on a daily time step in HEC-DSS format. These forecasts are then integrated into the reservoir model. The initial conditions are updated from the SCADA system to the model. Overall, this methodology translates the ensemble meteorological forecasts into suggested outflow scenarios for the Onatchiway and Lamothe reservoirs.

4.7.2 Verification

The continuous ranked probability score (CRPS, Matheson and Winkler 1976) assesses the skill of the ensemble streamflow forecasts against reconstituted inflows (for lack of direct observations) at corresponding dates. It is also used to evaluate the quality of meteorological ensemble forecasts. The CRPS is a common metric for assessing probabilistic forecasts (e.g., Candille and Talagrand 2005; Gneiting et al. 2005) and has the advantage of being reported in the units of the forecast and being the probabilistic equivalent of the mean absolute error (MAE) for deterministic forecasts. The CRPS is given by:

(23)

$$CRPS = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \int_{-\infty}^{+\infty} \left(F_t^e(x) - H(x \geq x_t^o) \right)^2 dx,$$

where $F_t^e(x)$ is the probability cumulative distribution function adjusted to the ensemble forecast at time step t , and $H(x \geq x_t^o)$ is the Heaviside function associated with the observation x_t^o of time step t . The CRPS is averaged over the n time steps.

In order to compare forecasts with climatology, the CRPS can be converted to a skill score, which is unitless, has a maximum value of 1 and no minimum. Any negative value means that the forecasting system has no skill compared to climatology. The CRPS skill score can be computed using equation (24).

(24)

$$CRPS_{SS} = 1 - \frac{CRPS_{forecasts}}{CRPS_{climatology}},$$

In addition to the CRPS, graphical verification tools can be used. The reliability diagram is one such tools. It consists in computing confidence intervals (here between 10 and 90%) and then computing the proportion of observations that are comprised into each confidence interval. The observed (effective) coverage of confidence intervals is then plotted against their nominal probability. For reliable forecasts, the 90% confidence interval (for instance) should include the observation 90% of the time.

4.8 Results

4.8.1 Validation of the calibration method

To verify that the observed streamflow could be reproduced reasonably well, the regionalization method was tested on three gauged catchments: à l'Ours, Bonaventure, and Valin rivers. Three catchments most similar to à l'Ours were identified—Morpions, Des Hurons, and Boyer—and they were applied as donor catchments to the à l'Ours system. The catchments of the Sainte-Anne, Nouvelle, and Matapédia rivers were determined as the optimal gauged donor catchments for the

Valin river. Similarly, the catchments of the Sainte-Anne, Nouvelle and Bras-du-Nord rivers were determined as the donor catchments for the Bonaventure river.

As both the donor and test catchments are gauged, performance metrics (NSE, MAE, and RMSE) between the observed and simulated streamflow from the hydrological model calibrated using donor catchments can be assessed. Calibration dates and validation periods vary between catchments due to differences in data availability. Our calibration and validation of the test catchments (Table 11) showed the Valin catchment as having the best goodness-of-fit between the reconstituted and observed streamflows. In contrast, the à l'Ours catchment presented the worst performance. Donor catchments of the à l'Ours system had the largest Euclidean distance values, and data are missing for two years for this catchment, thereby reducing the number of days for which the metrics can be computed relative to the other two better-fit catchments. Nonetheless, our overall results are strong enough to apply this approach to the sub-catchments of the Shipshaw River.

Table 11: Performance metrics obtained during the calibration and validation of the three catchments used to test the regionalization approach

	Calibration			Validation		
	NSE	MAE	RMSE	NSE	MAE	RMSE
	(No unit)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(No unit)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
à l'Ours	0.17	13.2	23.1	0.18	15.1	26.8
Bonaventure	0.61	35.5	20.6	0.60	35.6	20.7
Valin	0.72	8.2	8.3	0.71	13.5	14.4

4.8.2 Inflow forecasts for the ungauged sub-catchments of the Shipshaw River

After the model calibration, two types of series were produced: a *reconstituted streamflow* that was obtained using the calibrated hydrological model and observed meteorological data (from MELCC) and *inflow forecasts* that were obtained using the calibrated hydrological model and ensemble meteorological data (from Environment and Climate Change Canada).

Given that any decision support must be adapted to all types of meteorological events, three different seasons from three different years were tested. The three tests were 1) Fall 2010. Although discharge is not as great as during the spring freshet, fall is a flood-prone period for the Shipshaw catchment due to precipitation; however, 2010 was a particularly dry year, therefore water management during Fall 2010 had to be adapted; 2) Spring 2013, as the spring freshet is a crucial period of the hydrological year, during which time reservoirs are replenished. Spring 2013 corresponds to a typical spring freshet; and 3) Summer 2015, as Summer 2015 experienced more abundant precipitation than normal.

The mean CRPS as a function of the forecasting horizon at Onatchiway (Figure 7 (a)) and at Lamothe (Figure 7 (b)) illustrates that forecasting performance decreases with lead time, as expected. Meteorological forecasts that feed the hydrological model become increasingly uncertain as the lead time progresses, as evidenced when the mean CRPS increases with the greater lead time for precipitation forecasts compared with the observed precipitations for Fall 2010, Spring 2013, and Summer 2015. Table 12 provides the skill scores for precipitation and temperature. Here, climatological ensembles were built using observed data for the 20 previous years each time, in order to have the same ensemble size as the dynamical forecasts based on Environment and Climate Change Canada forecasts (which have 20 members). One can see from this table that the raw precipitation forecasts are often outperformed by climatology. Since a preliminary study of those data did not show any systematic bias, it is likely that the pre-processing of precipitation forecasts would require more investigation and a more sophisticated method (than just removing a systematic bias). Temperature forecasts, on the contrary, were found skillful compared to climatology.

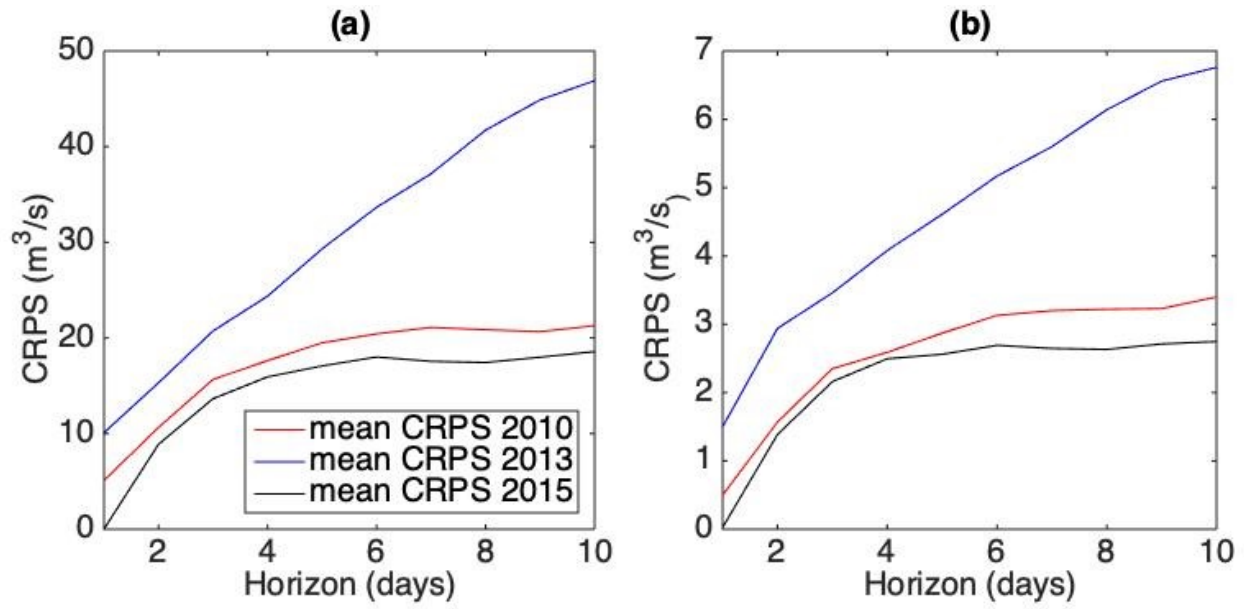


Figure 7: Evolution of the CRPS with the forecasting horizon for (a) Onatchiway and (b) Lamothe

Table 12: The CRPS skill scores (no units) for precipitation ensemble forecasts (Environment and Climate Change Canada) versus the observed precipitation data (MELCC)

		Onatchiway			Lamothe		
		H1	H5	H10	H1	H5	H10
Precipitation	2010	0.27	0.18	-0.52	0.28	0.16	-0.55
	2013	-0.02	-0.05	-0.13	-0.07	0.18	-0.51
	2015	0.14	0.13	-0.02	0.20	0.19	0.06
Temperature	2010	0.54	0.39	0.18	0.58	0.37	0.10
	2013	0.58	0.49	0.22	0.58	0.45	0.15
	2015	0.66	0.49	0.16	0.65	0.49	0.16

Figures 8 and 9 show the diagrams obtained for precipitation and temperature forecasts, respectively. Those figures show that temperature forecasts are more reliable than precipitation forecasts, although all forecasts exhibit under-dispersion.

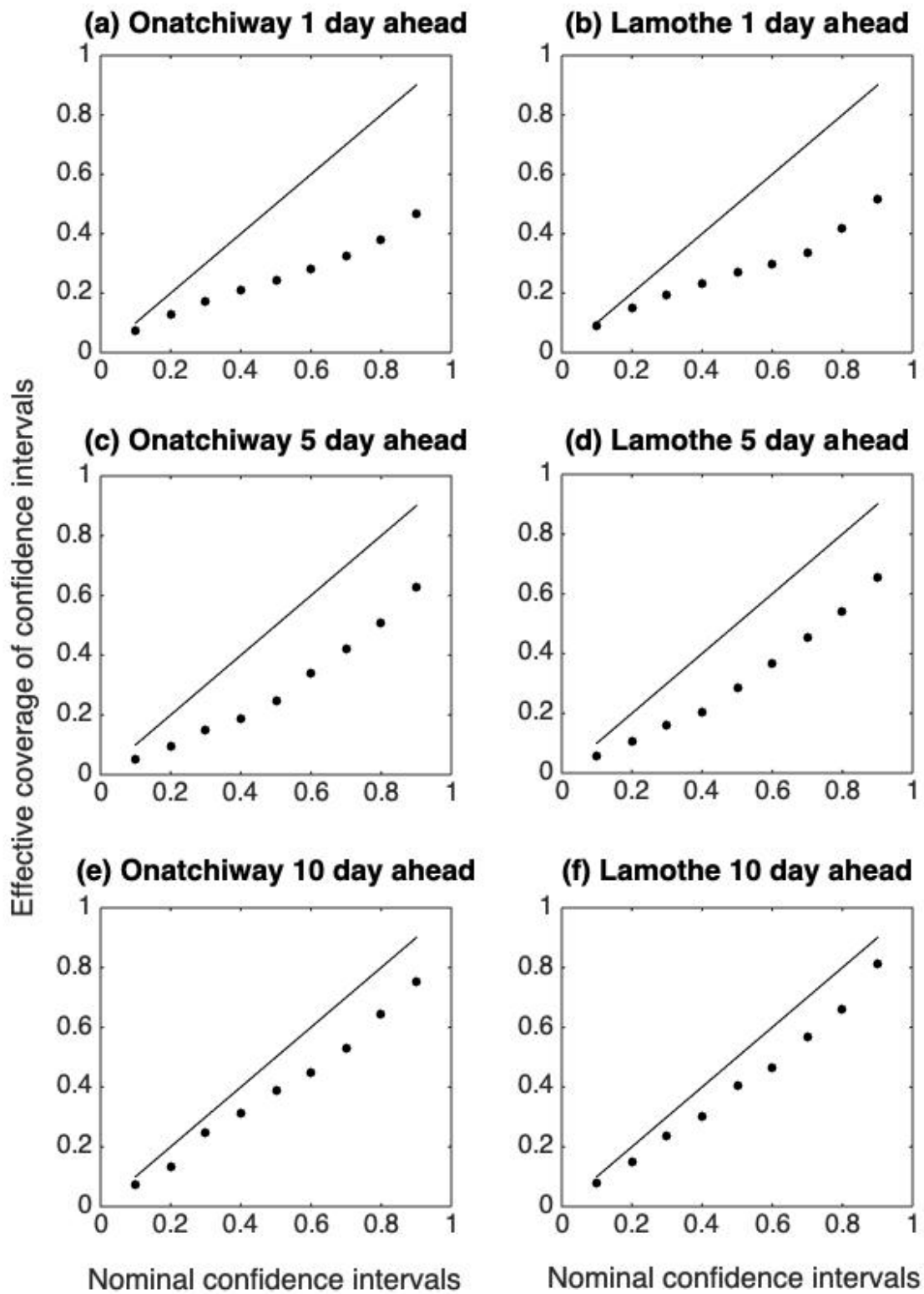


Figure 8: Reliability diagrams for precipitation forecasts 1, 5 and 10 day ahead

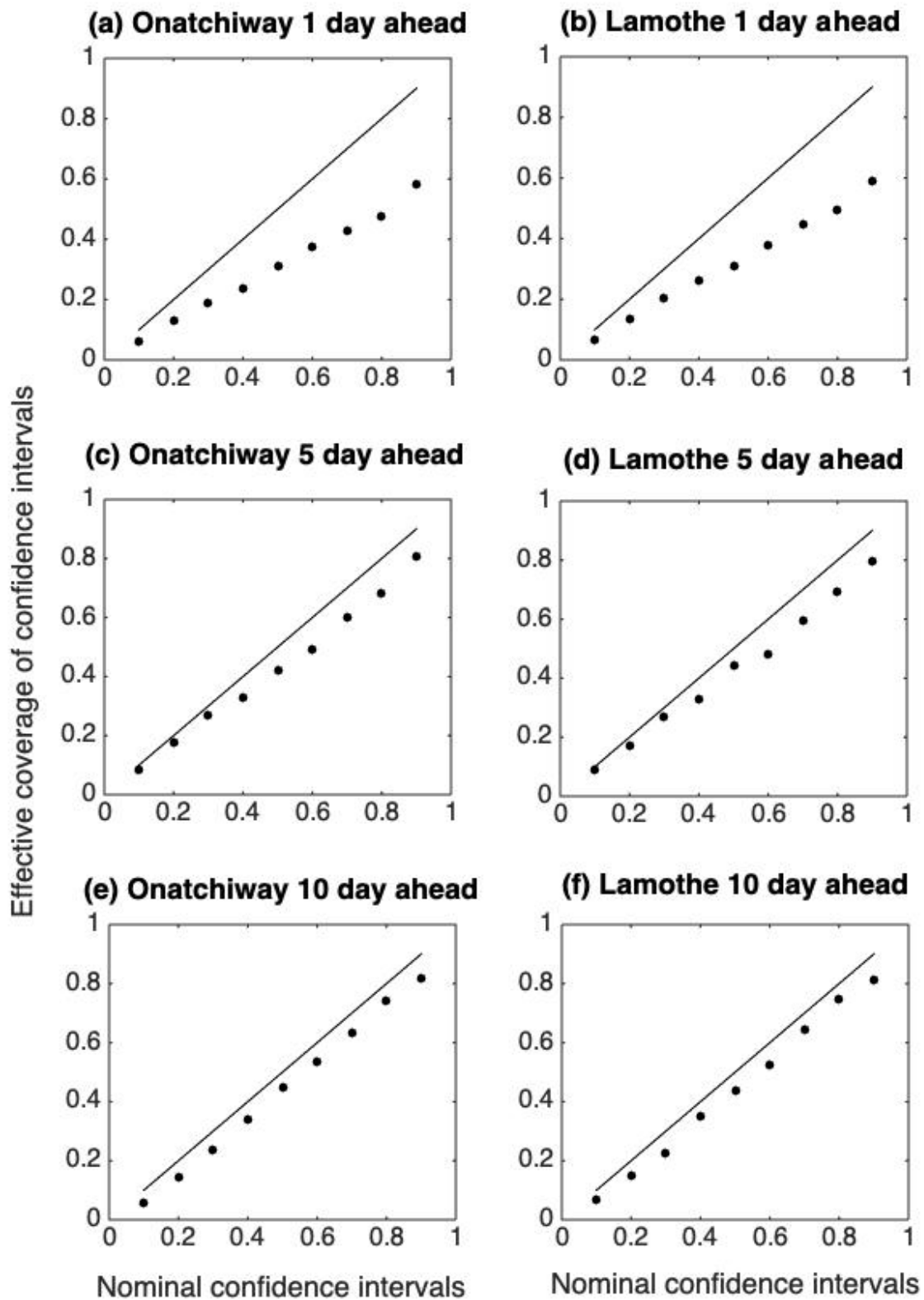


Figure 9: Reliability diagrams for temperature forecasts 1, 5 and 10 day ahead

Similarly, Figure 10 shows the reliability diagrams for the corresponding streamflow forecasts. They are highly under-dispersed for the first horizon (1-day ahead), which is can be explained by two factors. First, meteorological forecasts are under-dispersed. In addition, short-term streamflow forecasts are strongly influenced by initial conditions, especially for horizons that are shorter than the response time of the catchment. Here, as it is our first attempt at implementing a forecasting system on this catchment, and also because there is very little data availability, no data assimilation was performed. Therefore, the uncertainty related to the initial conditions is not accounted for in the forecasts.

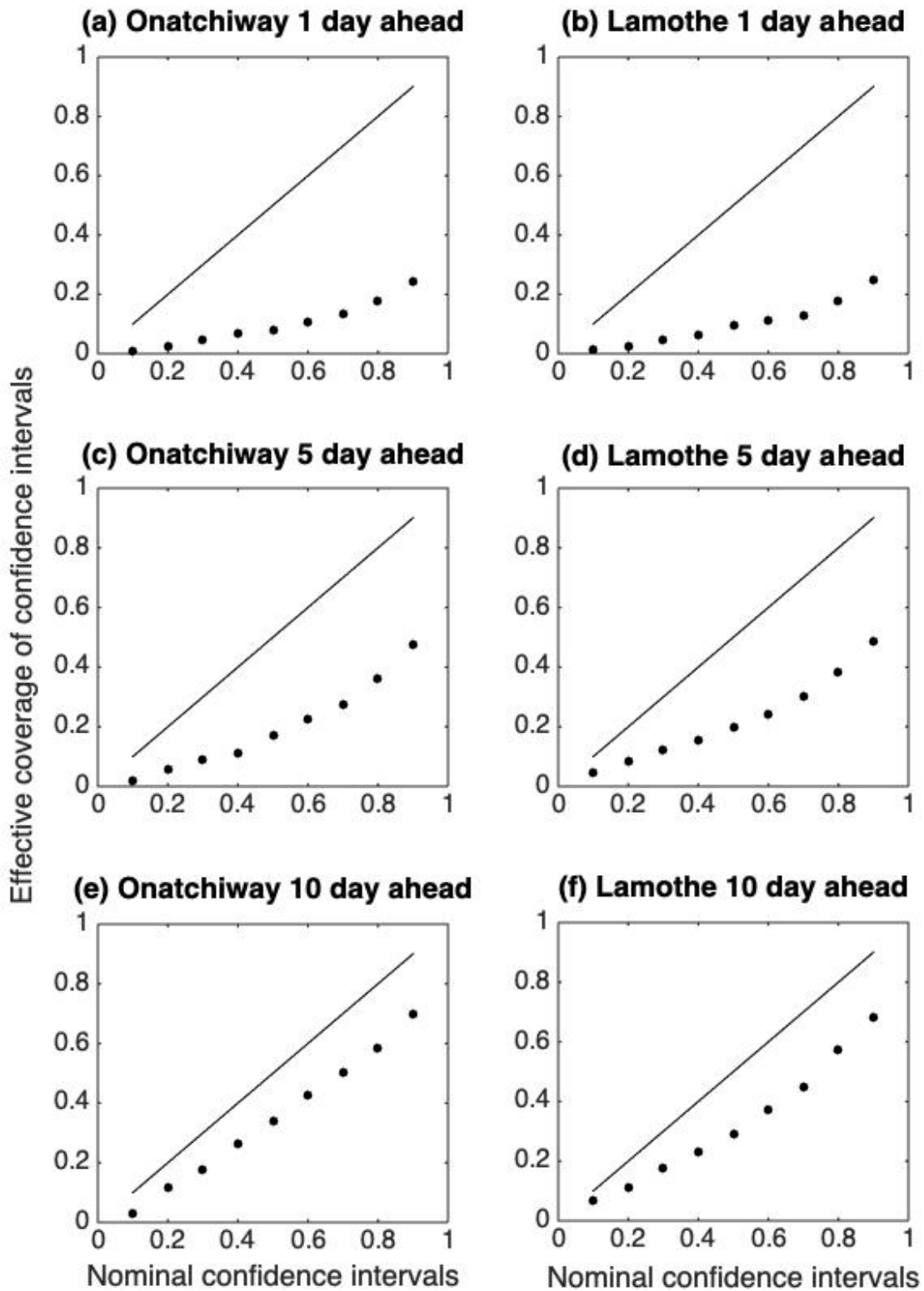


Figure 10: Reliability diagrams for streamflow forecasts 1, 5 and 10 day ahead

4.8.3 Comparison of actual and proposed operations using the HEC-ResSim and ensemble inflow forecasts

4.8.3.1 Fall 2010

Figure 11 presents the simulated reservoir elevations (in grey) compared to the observed reservoir elevations (in black bold dashed line). The black dashed lines are the minimum and maximum reservoir elevations to avoid breaching. At Onatchiway, the maximum elevation corresponds to the overflow crest elevation. If this elevation is reached, it is considered a water loss. At the Lamothe Reservoir, the maximal elevation is a nearby dike height. If this elevation is reached, it corresponds to a minor flood. Therefore, it is critical in both cases that the elevation of the reservoir remains below these thresholds.

As fall is often a wet season in the study region, the GC increases for the upstream reservoir (Onatchiway). The GC at the Lamothe Reservoir is fixed at 290.3 m, corresponding to the head that provides maximum energy production. All elevation scenarios of the Onatchiway Reservoir—as simulated by the reservoir model based on various inflow forecasts produced via the hydrological model—remain close to the elevation prescribed by the GC (Figure 11a, c, and d). For all forecasting horizons (here 1-, 5-, and 10-days ahead), variability between the 20 inflow forecast scenarios appears attenuated by the reservoir model. This attenuation occurs as the reservoir model aims to follow the GC regardless of the inflow forecast; therefore, only the initial time steps of the simulation present elevations that differ from the GC. The simulation begins with initial conditions that correspond to the observed outflow and observed reservoir elevation.

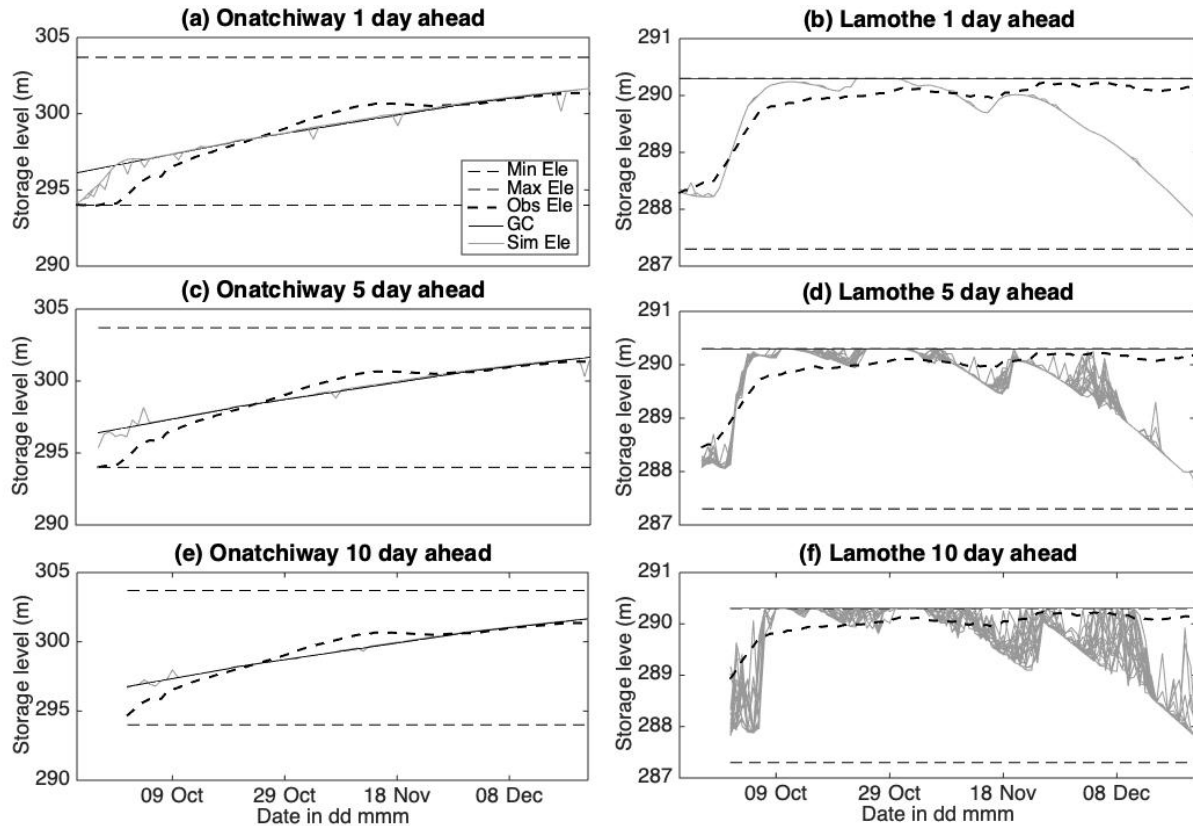


Figure 11: Evolution of the water level in the Onatchiway and Lamothe reservoirs during fall 2010

The “hydropower schedule” rule, added to the model for the Lamothe Reservoir, modifies the main goal of the reservoir model, as hydropower production is prioritized over following the GC. At the beginning and end of a simulation, for example, the elevations of the Lamothe Reservoir are below the GC. To maximize energy production and meet energy requirements, the reservoir model used the available water to produce energy rather than accumulating water within the reservoir and increase the elevation as per the GC. However, onward from the beginning of October, inflow to the reservoirs is sufficient for both energy production and raising the reservoir elevation to meet the GC requirements.

To provide an additional comparison to assess the benefit of the proposed system, Figure 12 presents the elevations simulated by the reservoir model when fed with the reconstructed streamflow climatology of the past 20 years rather than by dynamical forecasts. It appears from this figure that the reconstructed streamflow climatology does not allow the reservoir model to

follow the GC. This might be due to the fact that the reservoir model prioritizes energy production even when the inflow is low, to the expense of following the GC.

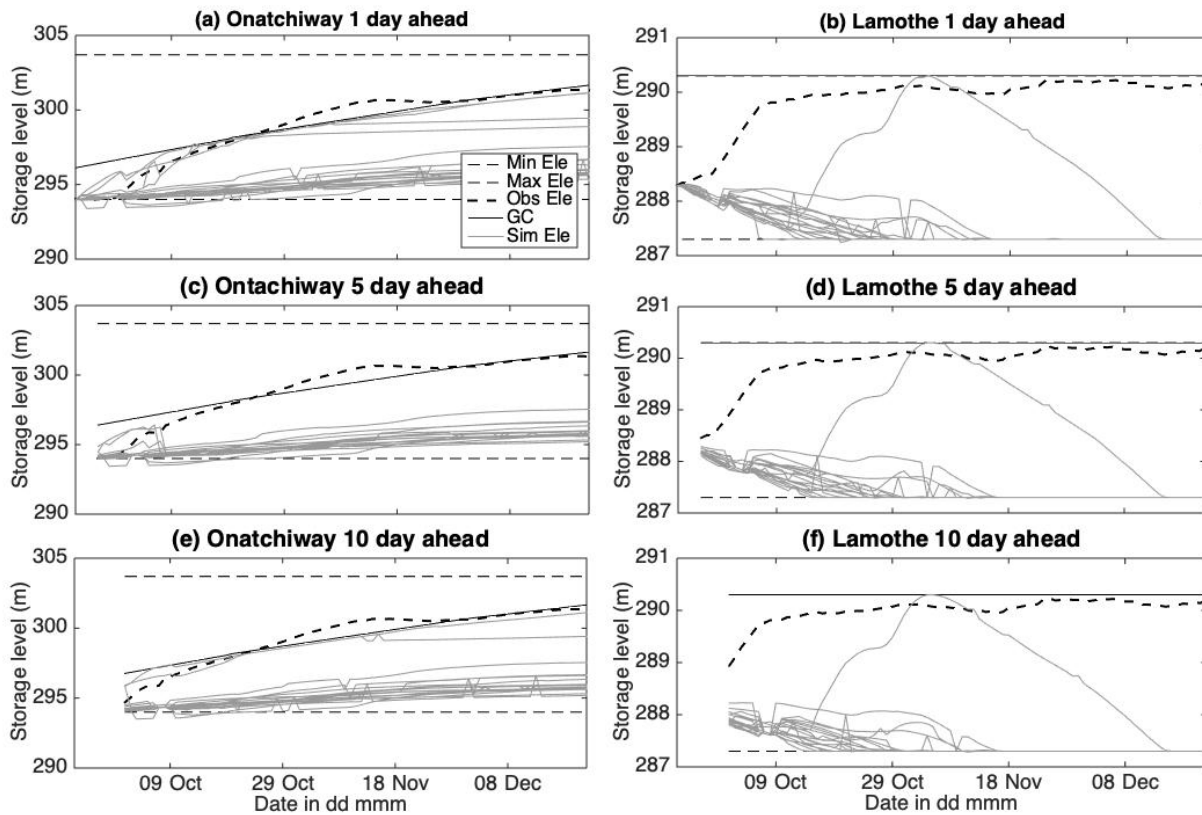


Figure 12: Reservoirs ‘elevations simulated by the reservoir model fed with the reconstructed streamflow climatology of the past 20 years

4.8.3.2 Spring 2013 and Summer 2015

Prior to the spring freshet, reservoir levels are lowered as close as possible to the minimum and are generally attained by the end of April. The GC thus allows for an increase of the reservoirs’ levels to accumulate water from snowmelt. During the summer, the GC prescribes slightly lower levels to accommodate fall precipitation.

For both Spring 2013 and Summer 2015, the observed inflow attained the overflow crest elevation at Onatchiway; for example, from 31 May 2013 to the end of the simulation (21 June 2013), the observed elevations for the Onatchiway are above the GC (Figure 13a, c, and d). Given a longer lead time, however, the reservoir model can anticipate these events and evacuate enough water in advance via the spillway and avoid water levels rising above the GC.

For the Lamothe Reservoir, elevations generally follow the GC without difficulty. At the end of April 2013, however, insufficient inflows could not simultaneously increase reservoir elevation based on the GC and produce energy.

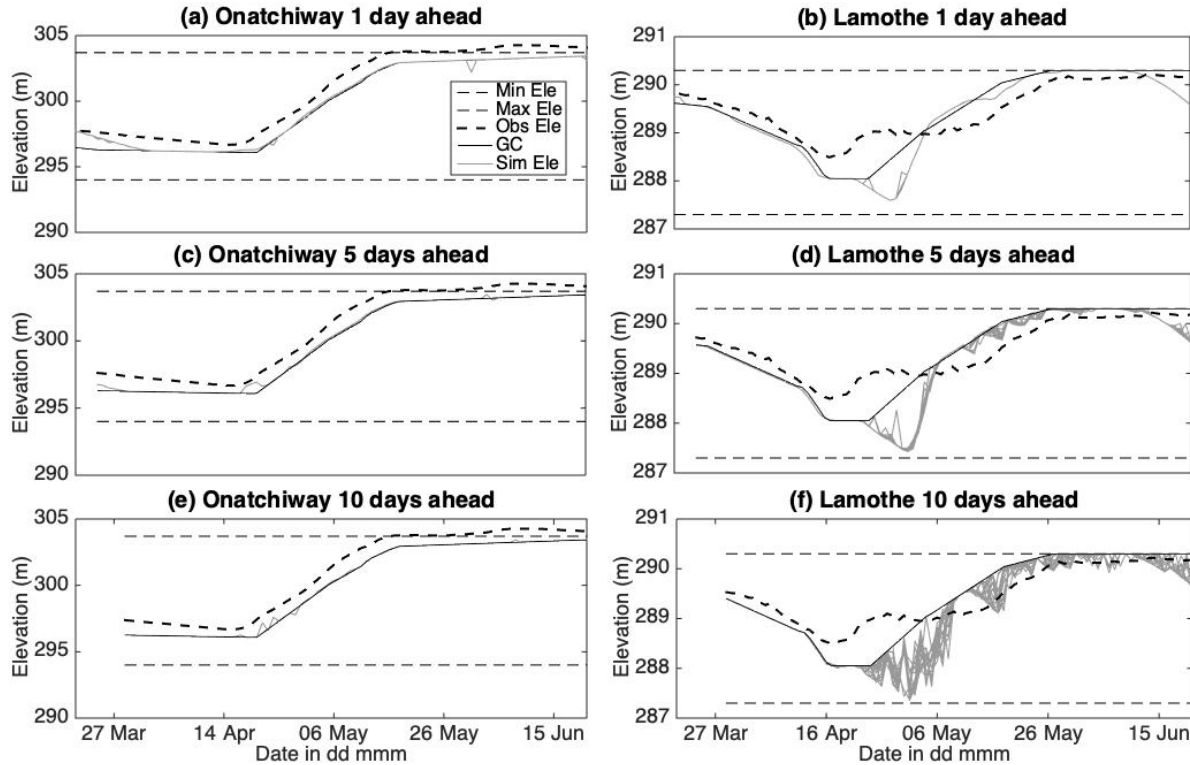


Figure 13 : Evolution of the water level in the Onatchiway and Lamothe reservoirs during the period of Spring 2013

4.8.3.3 Discussion

Our developed decision-support system demonstrates its advantages over expertise-based decisions and how this approach can benefit reservoir management. This is especially true where hydrological forecasts can anticipate events and lead the reservoir model to plan water releases accordingly. Thus, our study demonstrates that for our study case of the ungauged Shipshaw River catchment, a decision-support system improves the ability to anticipate hydrological events better than expert judgment and also satisfies operation policies better than expert judgment alone.

When total energy produced by the model is compared with the actual production in Fall 2010, Spring 2013 and Summer 2015, which was solely based on expert judgment (Figure 14), it is possible to see that in general, the model is able to suggest decisions that would have increased the

energy production, potentially by 2 to 60% . Note that the observed energy production varies between horizons as the considered dates are different. For instance, the computation for the 10-day horizon begins nine days later than that of the 1-day horizon. Therefore, the total energy produced for the 10-day horizon is lower than for the 1-day horizon. Our results illustrate that even a very simple reservoir model can help increase hydropower production.

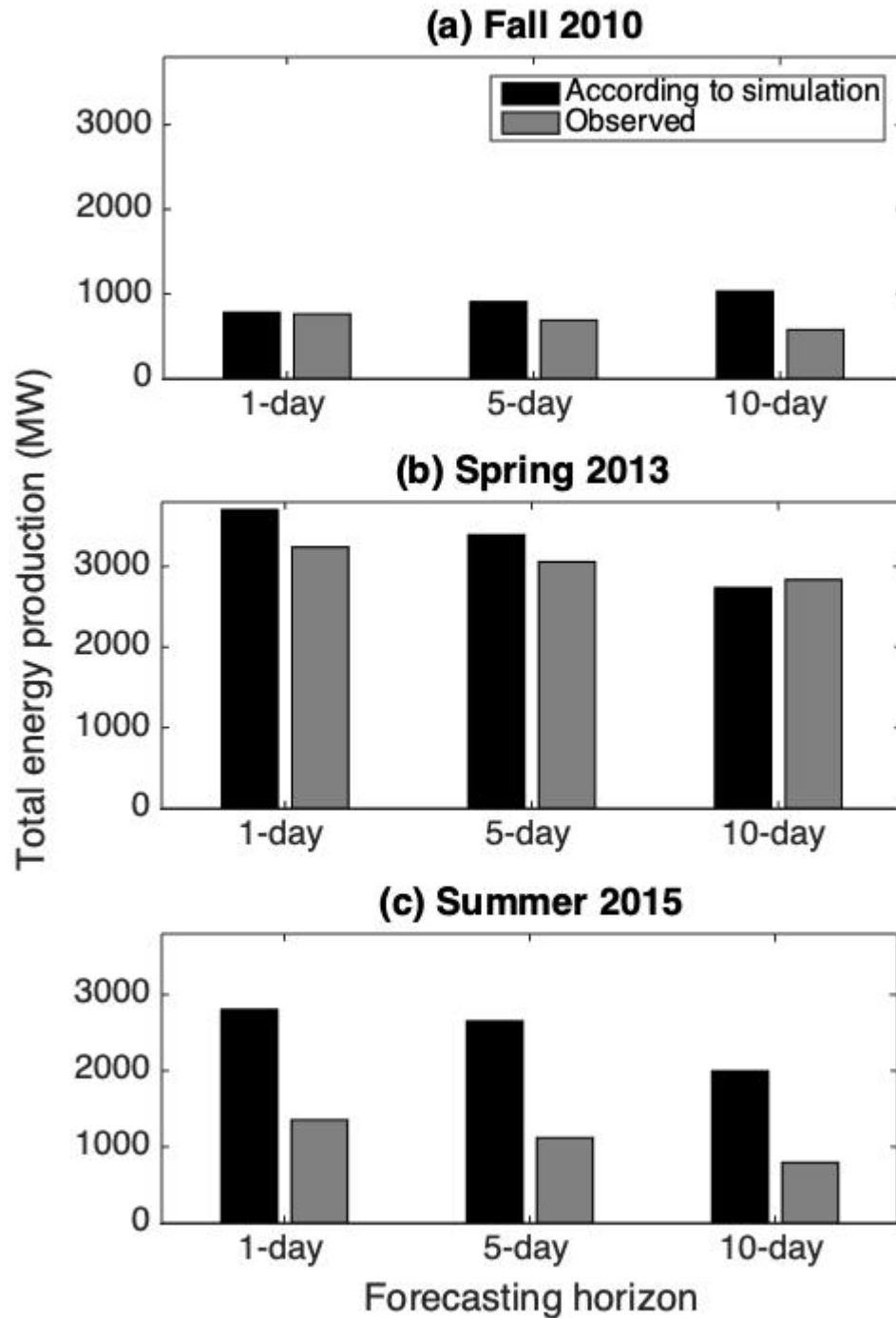


Figure 14: total energy produced by the model is compared with the actual production in Fall 2010 (a), Spring 2013 (b) and Summer 2015 (c)

Although for all three study periods reservoir management was improved—via greater energy production and, in the case of Spring 2013, safer maximum reservoir levels —our inflow forecasts could be improved in many ways. For example, a data assimilation method could be implemented

to (1) improve the estimate of initial conditions and (2) quantify the uncertainty linked to these initial conditions. Indeed, despite the fact that streamflow observations are not available, it would be possible to assimilate observations for snow water equivalent or snow depth in the model, or variables such as soil moisture, retrieved for instance from remote sensing. Moreover, our developed reservoir model remains rudimentary when compared with a more sophisticated model that defines reservoir operation policy more precisely and allows for optimization, for example via the use of a stochastic dynamic function. For instance, our reservoir model prioritizes energy production without any preoccupation that turbinning water with a high head is often more advantageous (higher potential energy). This is especially true when considering that hydrological forecasts allows for anticipating events in advance and let the reservoir model plan releases accordingly. Thus, neither hypotheses stated in the introduction and above can be falsified for the Shipshaw River system. The proposed system shows encouraging results in terms of anticipating events on the Shipshaw River and satisfying operation policies. Notwithstanding the many potential improvements to our system, the simple tools presented here are efficient to complement expert judgment and are easily adaptable and transferable to other similar operational contexts.

4.9 Conclusion

The management of river–hydroelectric reservoir systems must consider multiple, and sometimes contradictory, objectives and constraints. Here, a decision-support system is developed and applied to an ungauged catchment (Shipshaw River, Quebec, Canada) that consisted of ensemble hydrological forecasts and a reservoir model. The suggested water management decisions were then compared with actual expertise-based decisions. A hydrological model (HEC-HMS) that was successfully calibrated using donor catchments was applied to each sub-catchment of the Shipshaw River system and fed with meteorological ensemble forecasts to generate inflow forecasts for the two main reservoirs of the Shipshaw River catchment. These inflow forecasts served as inputs to a reservoir model that was then compared with actual decisions made in regard to reservoir levels, releases, energy production based on expert judgment. Our study shows that the proposed decision-support system offers safer and improved water management by avoiding reservoir levels reaching crest elevations during periods of abundant inflow and by increasing energy production.

5 CONCLUSION

La gestion d'un système de réservoirs implique de considérer de multiples objectifs et de multiples contraintes qui ne sont pas toujours en coordination les uns avec les autres. Afin d'optimiser la production énergétique de manière sécuritaire, Hydro-Saguenay base la gestion des quatre réservoirs, présents sur la rivière Shipshaw, sur le jugement expert. Ce mode de gestion peut être qualifié de subjectif [Pagano et al., 2016] et se base sur des données météorologiques passées qui sont sources d'incertitude, surtout dans un contexte de changements climatiques.

Dans ce contexte, le développement d'un outil d'aide à la prise de décision, tenant compte des prévisions météorologiques, permet de vérifier deux hypothèses. La première est que cet outil va permettre de mieux satisfaire les règles de gestion des réservoirs. La vérification de cette hypothèse était l'objectif principal de cette maîtrise. La seconde hypothèse, sous-jacente à la première, est que cet outil va permettre une anticipation d'événement météorologique plus longtemps à l'avance que lorsque la gestion est uniquement basée sur le jugement expert.

Le système d'aide à la prise de décision développé, conçu dans le cadre de ce travail de maîtrise, tient compte :

- D'un modèle hydrologique (HEC-HMS). Ce modèle permet de générer les prévisions des apports naturels à l'entrée des réservoirs. Il a été calibré à l'aide de la méthode par similitude physique. Dans un contexte de développement d'un outil d'aide à la prise de décision, l'utilisation de cette méthode constitue la première nouveauté de cette étude.
- D'un modèle de réservoirs (HEC-ResSim). Ce modèle nécessite en entrée les prévisions des débits obtenus par le modèle hydrologique, les contraintes d'opération du système (les caractéristiques des réservoirs et les règles de gestion d'opération) et les conditions initiales (fournies par le système SCADA).
- Des prévisions météorologiques d'ensemble. Ces prévisions permettent de tenir compte de l'incertitude liée aux prévisions météorologiques sur les niveaux et les débits sortants des débits futurs.

Durant les trois périodes étudiées (automne 2010, printemps 2013 et été 2015), les débits et les niveaux d'eaux atteints à la sortie des réservoirs Onatchiway et Lamothe avec le mode de gestion basé sur le jugement expert (système opérationnel) sont comparés avec les débits et les niveaux d'eaux atteints basés sur le système d'aide à la prise de décision proposé. Cette comparaison représente la principale contribution scientifique de cette étude.

Pour ces trois périodes, on constate que les pertes d'eau provoquées par l'utilisation du déversoir auraient pu être évitées avec le nouveau système d'aide à la prise de décision. Ainsi, l'utilisation du système d'aide à la prise de décision permet de confirmer l'hypothèse que certains événements

météorologiques auraient pu être anticipés plus longtemps à l'avance à l'aide du système proposé ici, comparativement au mode de gestion actuel. De plus, durant les trois périodes étudiées, le nouveau système d'aide à la prise de décision permet une production énergétique supérieure. Ces résultats permettent de confirmer la première hypothèse. En particulier, la production énergétique au réservoir Lamothe est améliorée par l'utilisation du système d'aide à la décision proposé.

Il est à noter que généralement, la comparaison d'un modèle de gestion avec la réalité est meilleure puisque des imprévus non simulables dans le modèle peuvent arriver (ex. vannes difficiles à ouvrir, travaux sur le système, etc...).

Les prévisions d'apport aux réservoirs pourraient encore être améliorée, et ce de plusieurs façons.

À commencer par l'installation des stations permettant d'obtenir des niveaux d'eau et de débits observés à différents endroits et ainsi caler le modèle hydrologique sur des observations.

Puis, par le développement d'une méthode d'assimilation de données afin (1) d'améliorer l'estimation des conditions initiales du bassin versant faite par le modèle hydrologique (grâce à la période de chauffe) et (2) de quantifier l'incertitude sur ces conditions initiales.

De plus, les objectifs de gestion des réservoirs ne se basent pas uniquement à l'échelle d'une saison. En effet, les règles d'opération du système de réservoirs et les objectifs de production énergétique varient tout au long de l'année.

De fait, les prévisions des débits sortants des réservoirs pourraient être améliorés par des simulations à long terme (plusieurs années) afin de savoir s'il est préférable de turbiner l'eau disponible dans le réservoir ou de la conserver pour plus tard.

Le modèle de réservoir mis en place ici demeure assez rudimentaire, bien que déjà très satisfaisant. Il serait pertinent de chercher à le comparer à un modèle d'optimisation des opérations, par exemple basé sur la programmation dynamique stochastique. Ceci permettrait de vérifier l'hypothèse selon laquelle un modèle plus complexe que HEC-ResSim permet d'obtenir des gains substantiels en termes de production hydroélectrique.

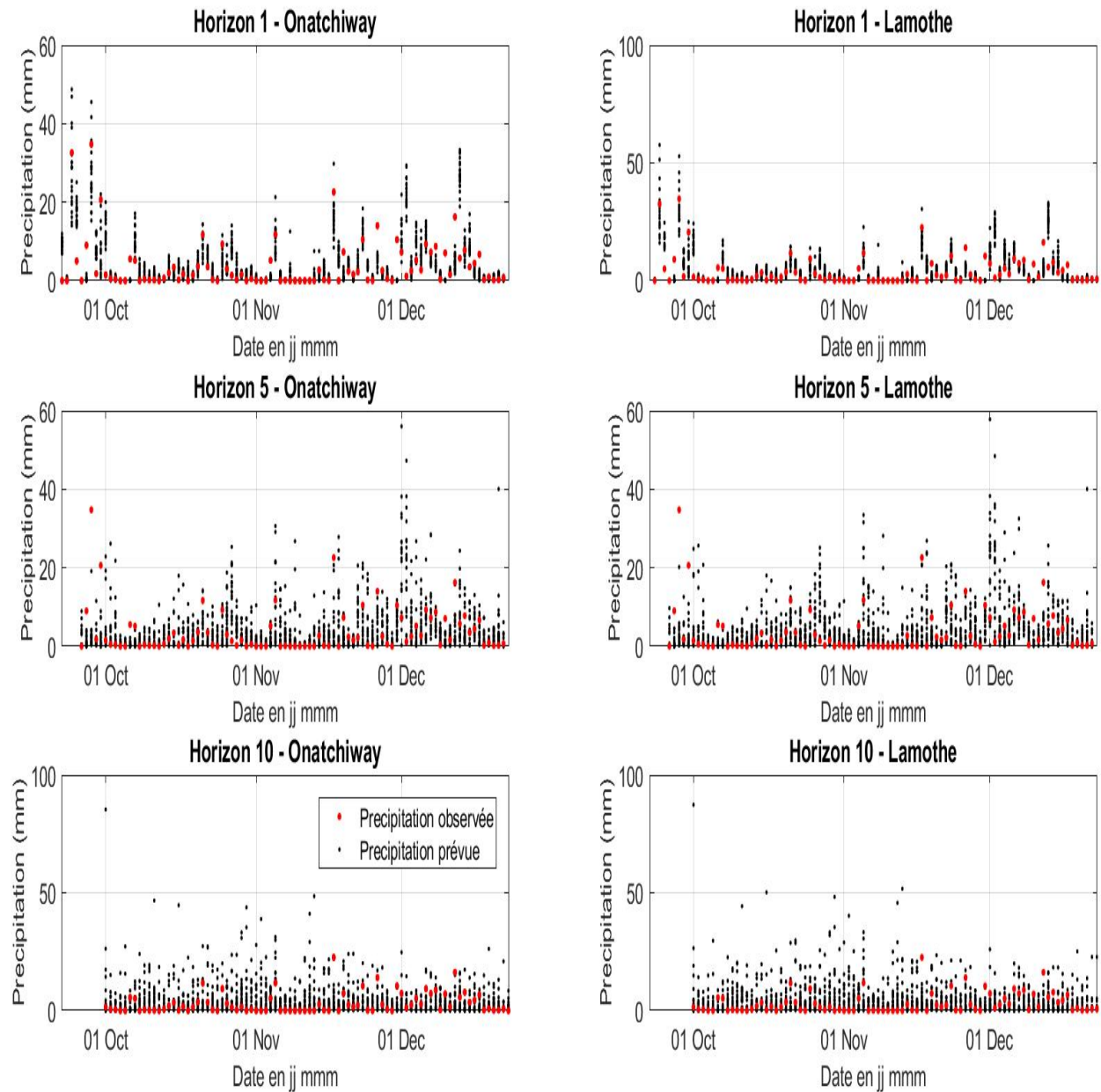
Considérant que la rivière Shipshaw est également utilisée à des fins récréotouristiques (rafting, kayak d'eau vive), cette étude ouvre la porte à d'éventuelles études de gestion intégrée des eaux, qui permettraient de regrouper l'ensemble des usagers de la rivière (producteurs d'énergie, récréotourisme et services écologiques).

Enfin, cette étude peut intéresser d'autres sociétés industrielles possédant des barrages puisque, avec les changements climatiques, une gestion basée sur le jugement expert, lui-même fondé en grande partie sur la météorologie passée devient de plus en plus difficile à maintenir. La modélisation hydrologique devient un outil économique pour améliorer la prise de décision dans ce contexte de changements climatiques.

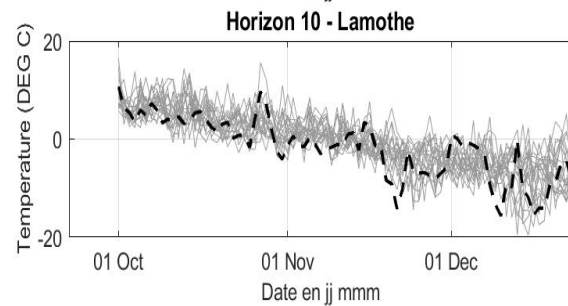
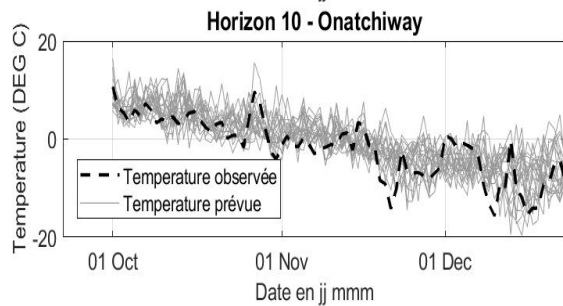
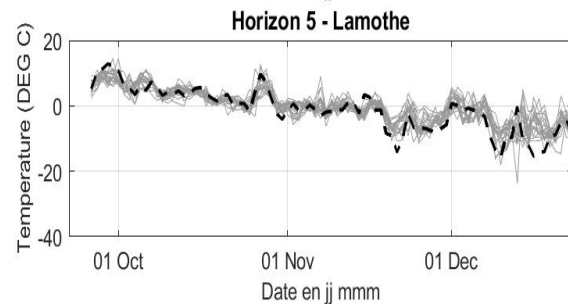
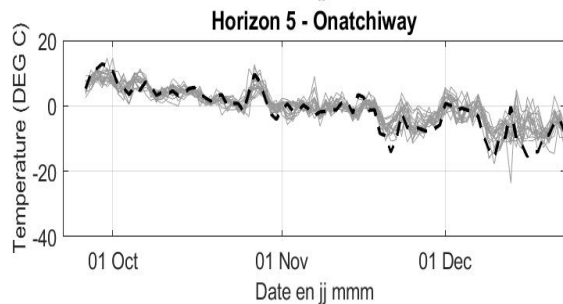
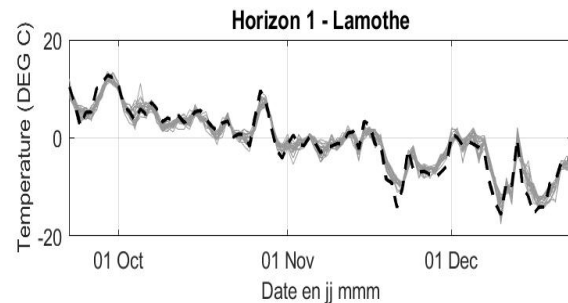
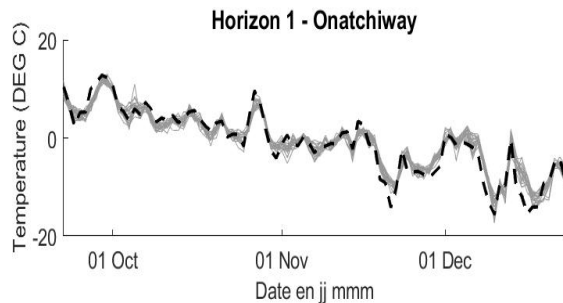
ANNEXES

ANNEXE A

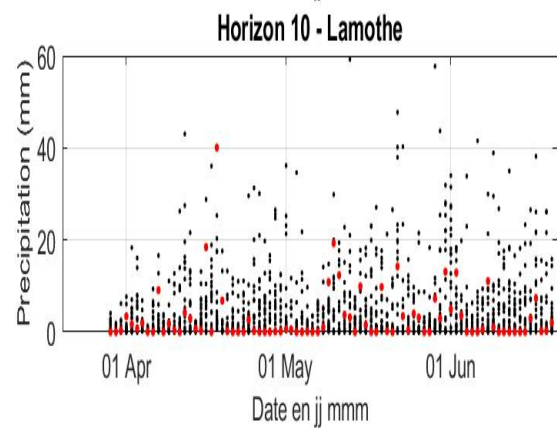
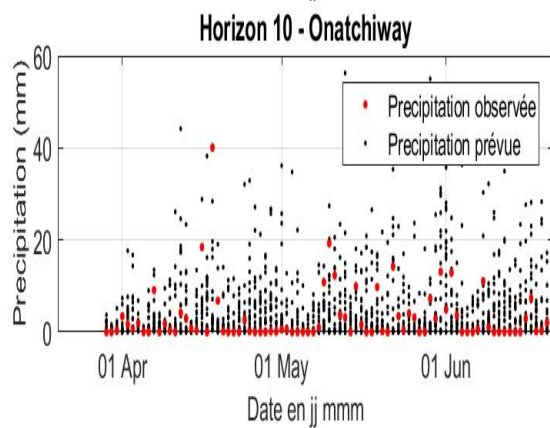
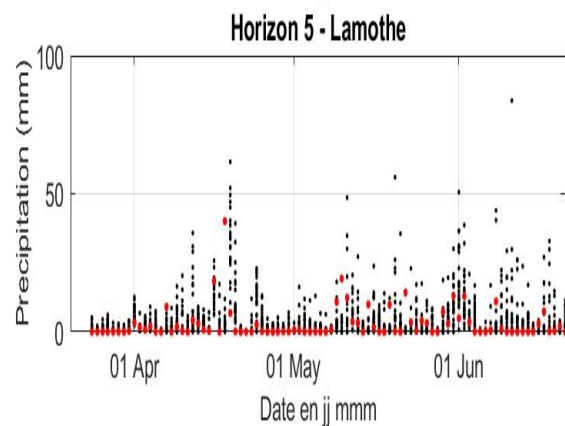
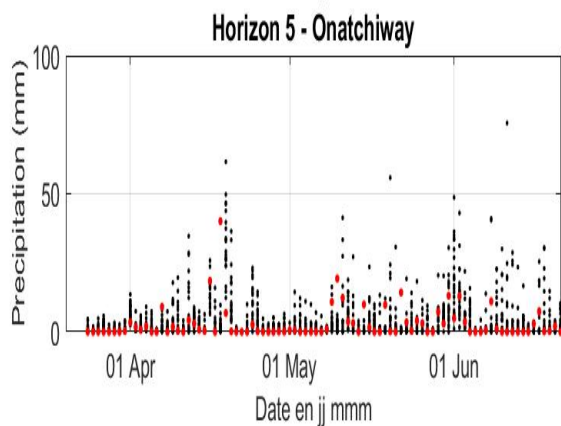
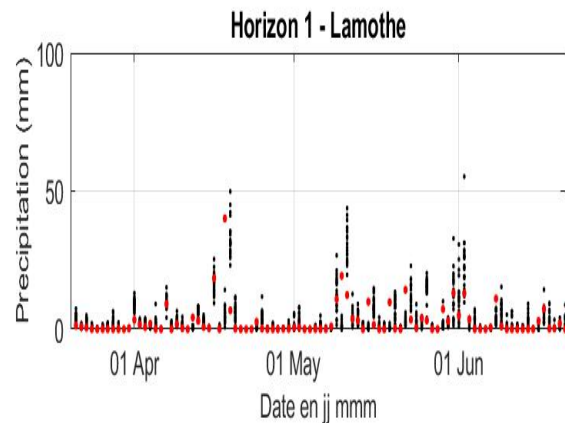
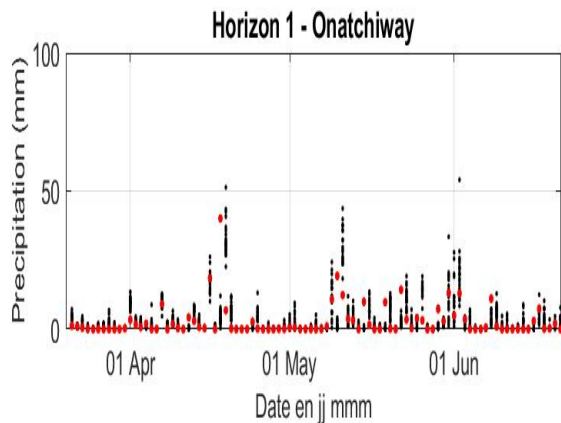
A.1 Comparaison des données de précipitation prévisionnelles et observées à l'automne 2010



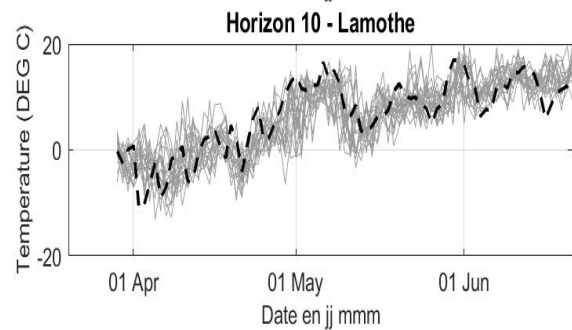
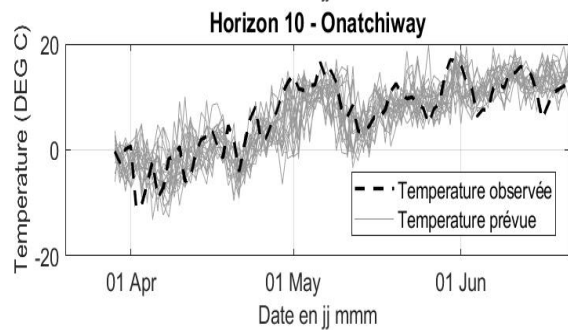
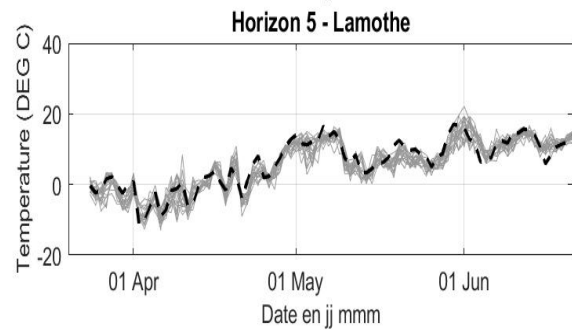
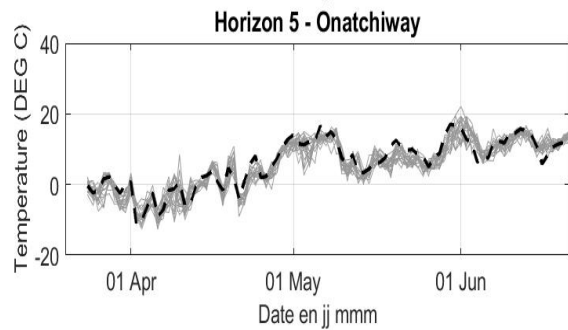
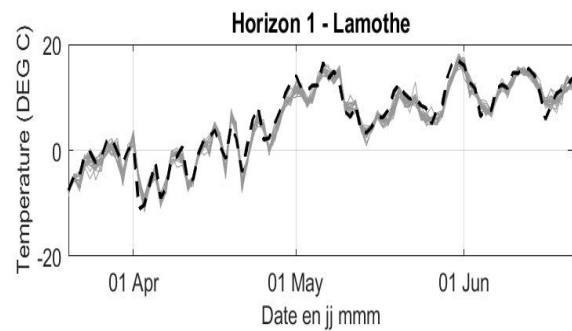
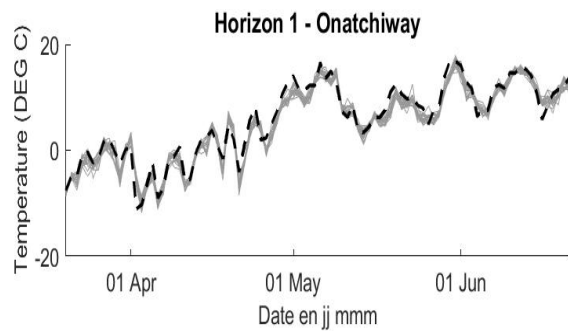
A.2 Comparaison des données de température prévisionnelles et observées à l'automne 2010



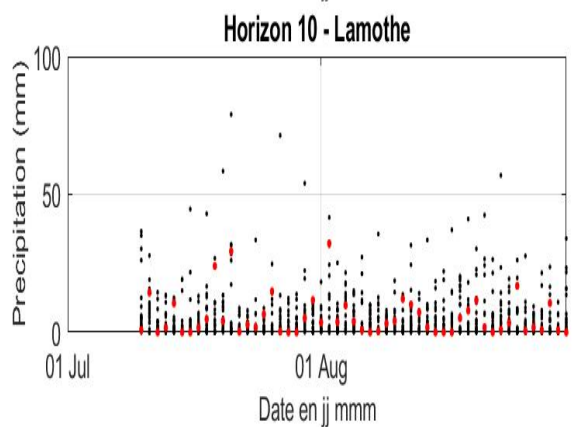
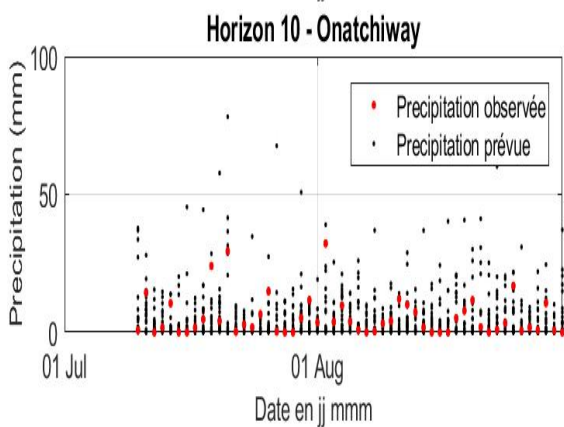
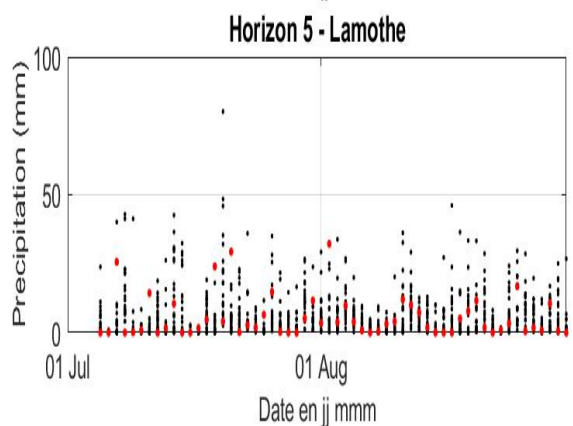
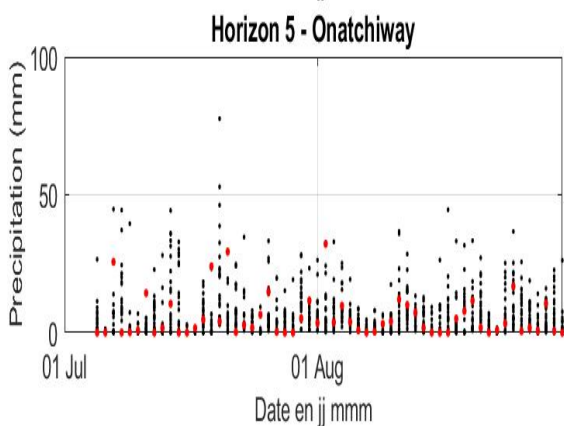
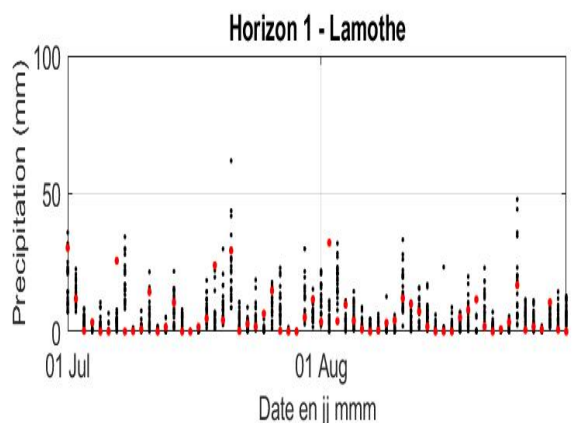
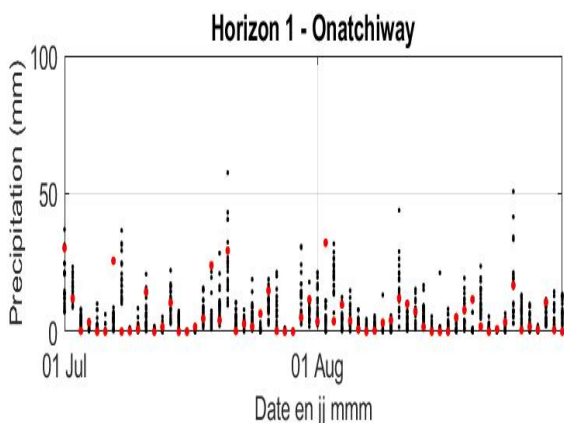
A.3 Comparaison des données de précipitation prévisionnelles et observées au printemps 2013



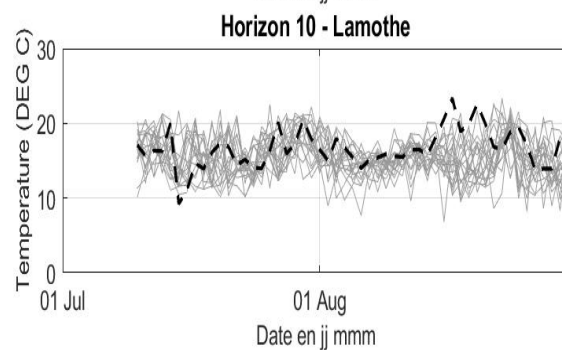
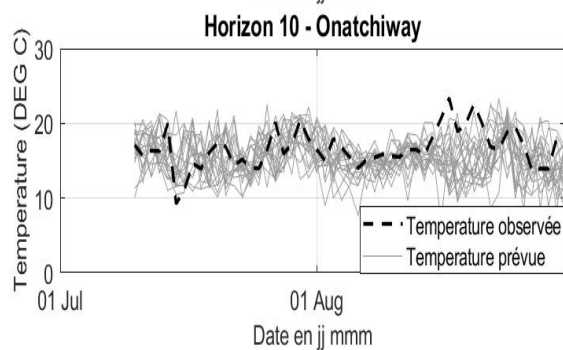
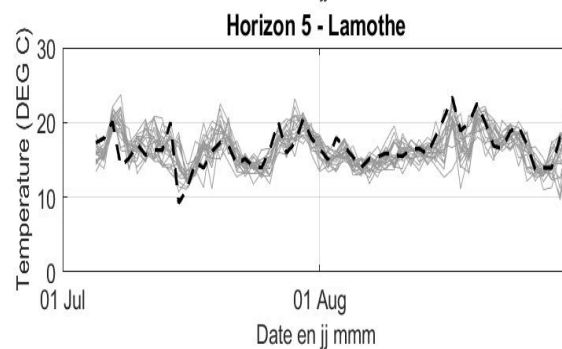
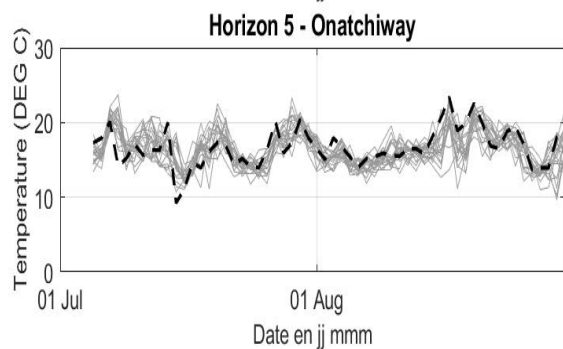
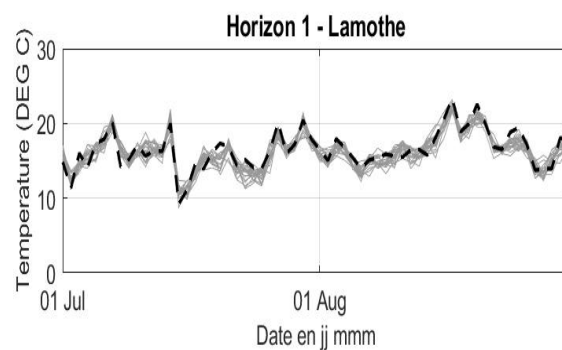
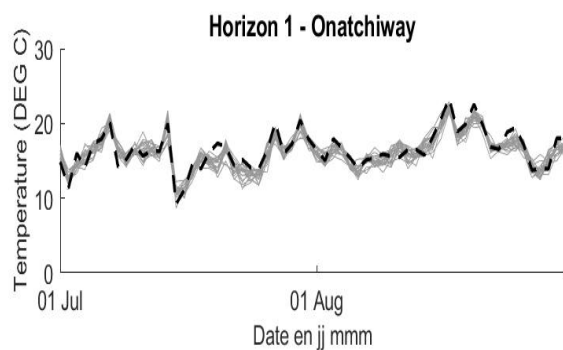
A.4 Comparaison des données de température prévisionnelles et observées au printemps 2013



A.5 Comparaison des données de précipitation prévisionnelles et observées à l'été 2015

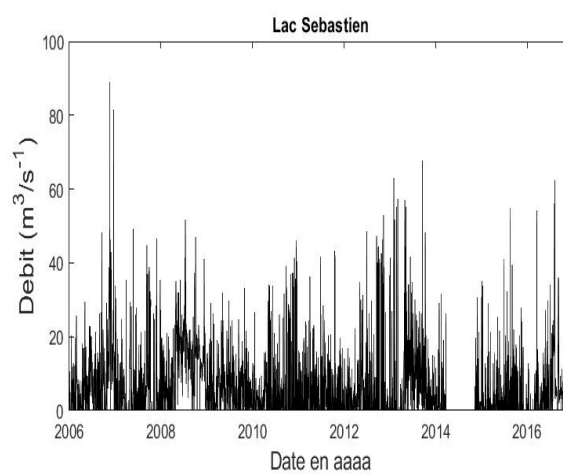
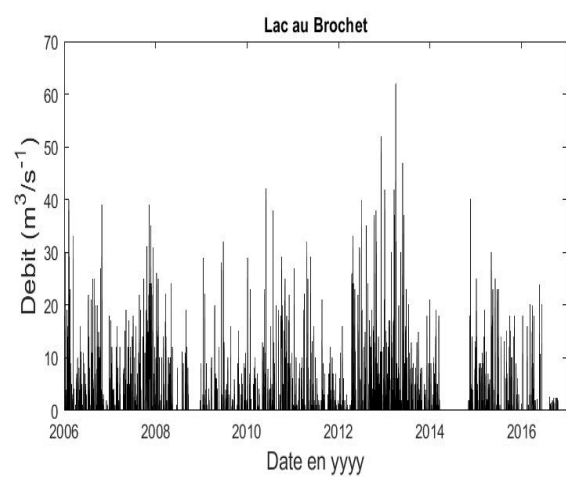
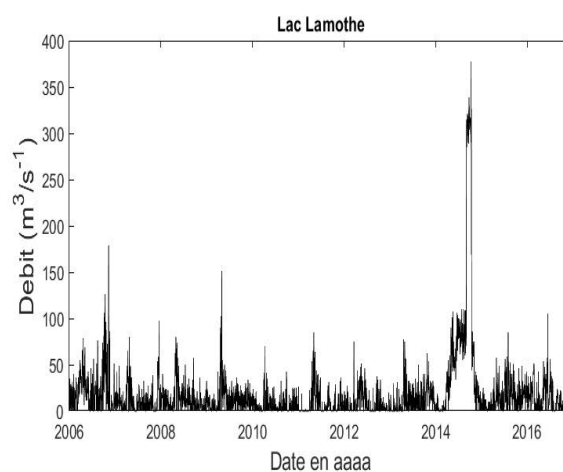
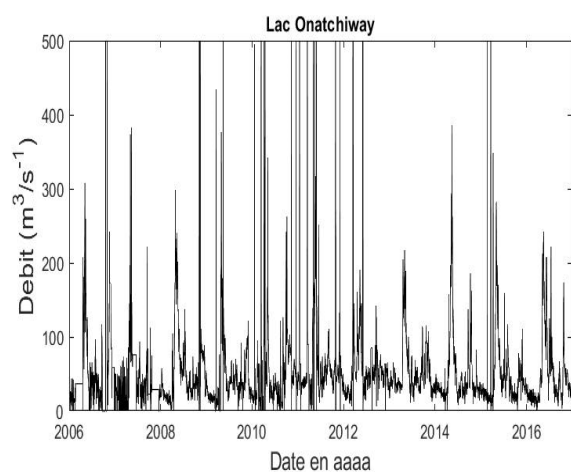


A.6 Comparaison des données de température prévisionnelles et observées à l'été 2015



ANNEXE B

Hydrogrammes des apports naturels calculés par bilan de masse des réservoirs de la rivière Shipshaw



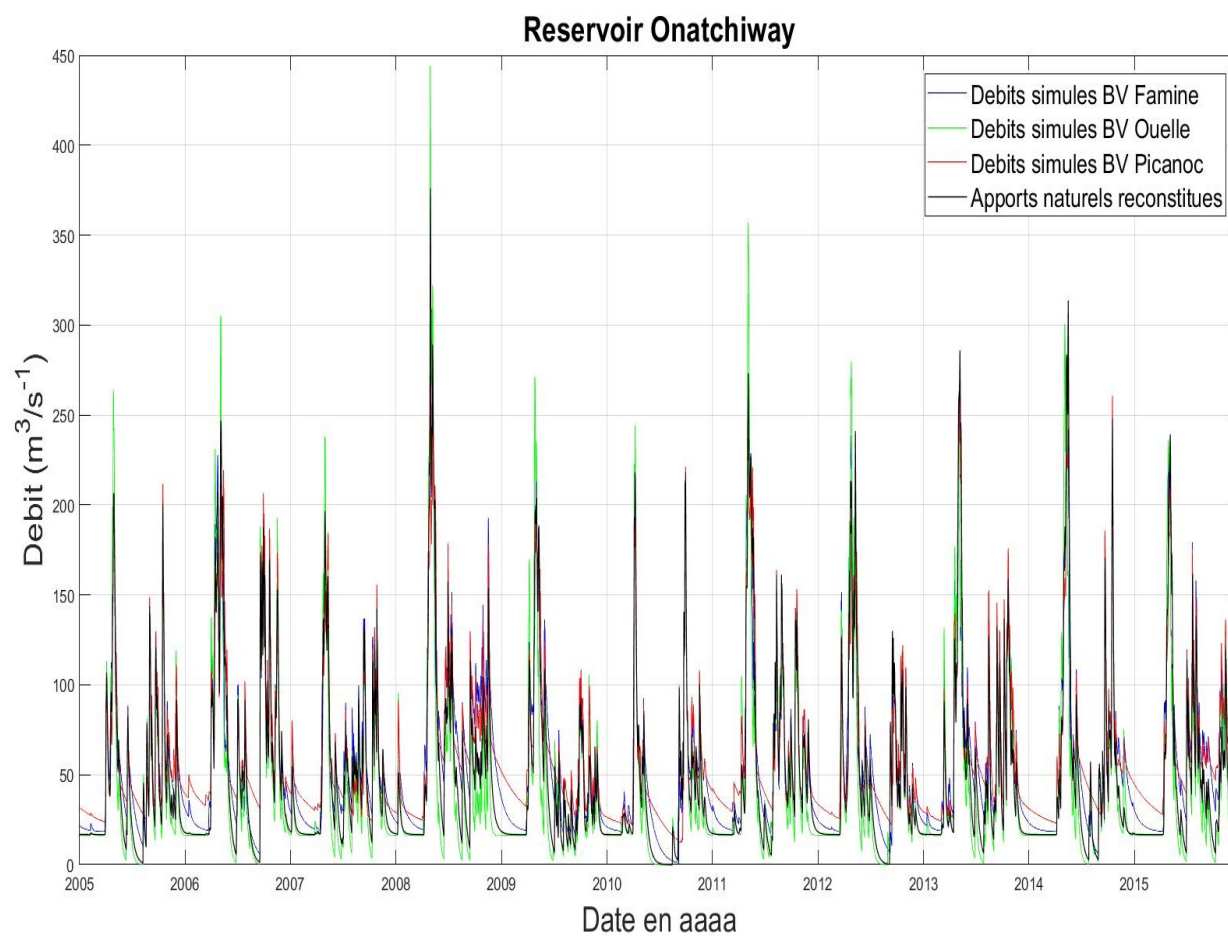
ANNEXE C

Tableau des caractéristiques et de la distance Euclidienne des BV donneurs du bassin receveur Valin

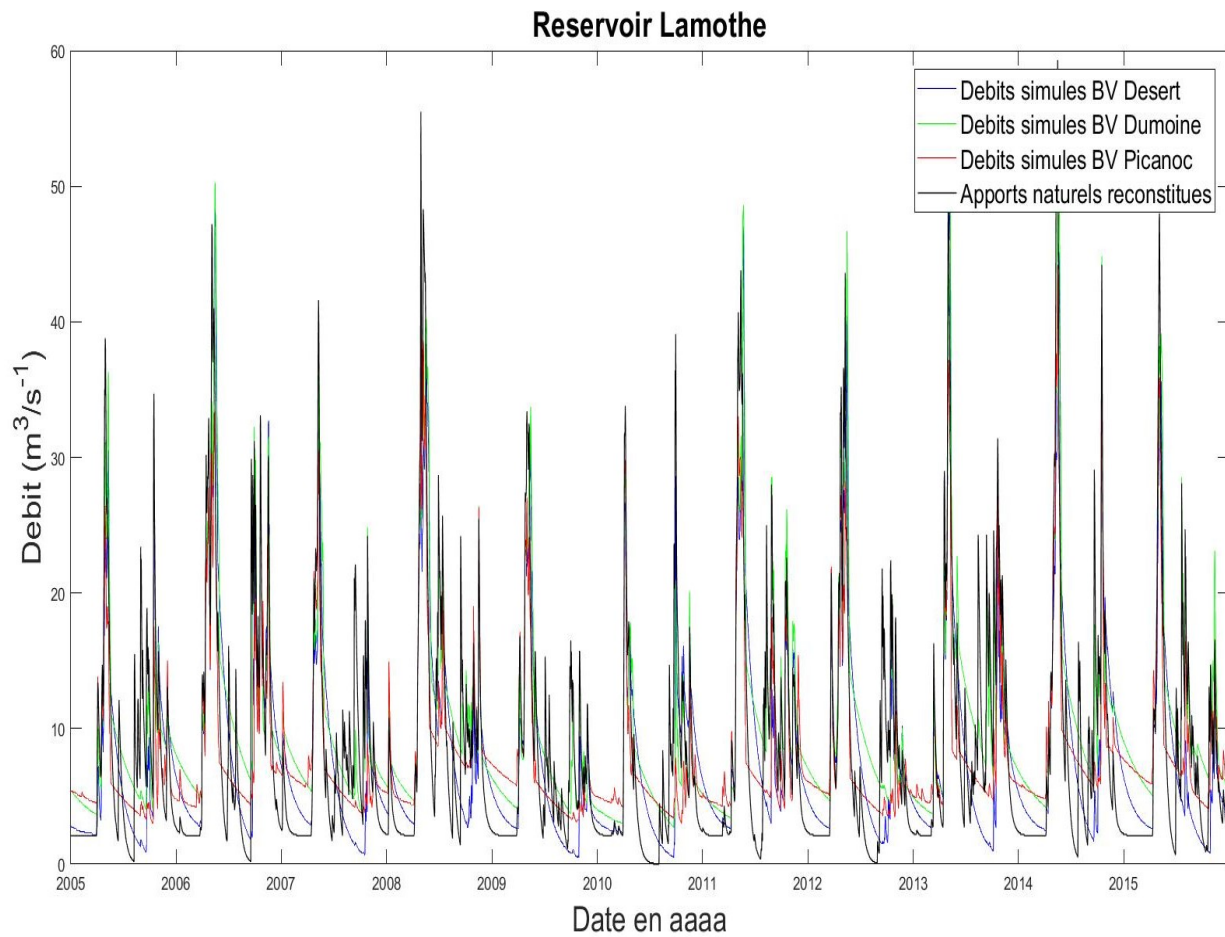
	Saint Anne	Nouvelle	Matapedia	VALIN
Distance Euclidienne avec Valin	0.12	0.132	0.134	-
Caractéristiques				
Superficie du bassin versant (km ²)	772	1139	2753	768
Precipitations annuelles moyennes (mm/an)	1065	1074	1076	1073
Region hydrique	2	1	1	6
Altitude moyenne (m)	562	407	326	500
Altitude mediane (m)	560	434	324	520
Pente moyenne (°)	13	11	5	8
Pente mediane (°)	11	8	4	7
Densite de drainage	1.4	1.9	1.8	2.8
Superficie de foret (%)	88	98	86	94
Superficie de zones agricoles (%)	9	0.4	9.3	0.6
Superficie de zones urbaines (%)	0.09	0.04	0.7	0.3
Superficie de milieux humides (%)	0.6	0.4	1	2.1
Superficie d'eau (Lacs et rivières) (%)	1	0.2	2.5	3
Superficie de sablières et carrières (%)	0.03	0	0.08	0.07
Superficie de depots grossiers G, bonne permeabilite (%)	25.4	25.6	6.3	12.9
Superficie de depots fins F, mauvaise permeabilite (%)	1.7	0.3	4.3	2.9
Superficie de depots mixtes M, interstratification G/F (%)	29.1	71.5	55.2	0
Superficie de depots incertins ou indetermines I (%)	42.9	1.8	33.4	84.2
Ordre du cours d'eau principal	5	5	5	6
Forme du bassin versant (Compacite de 1 a 3)	3	3	1	2

ANNEXE D

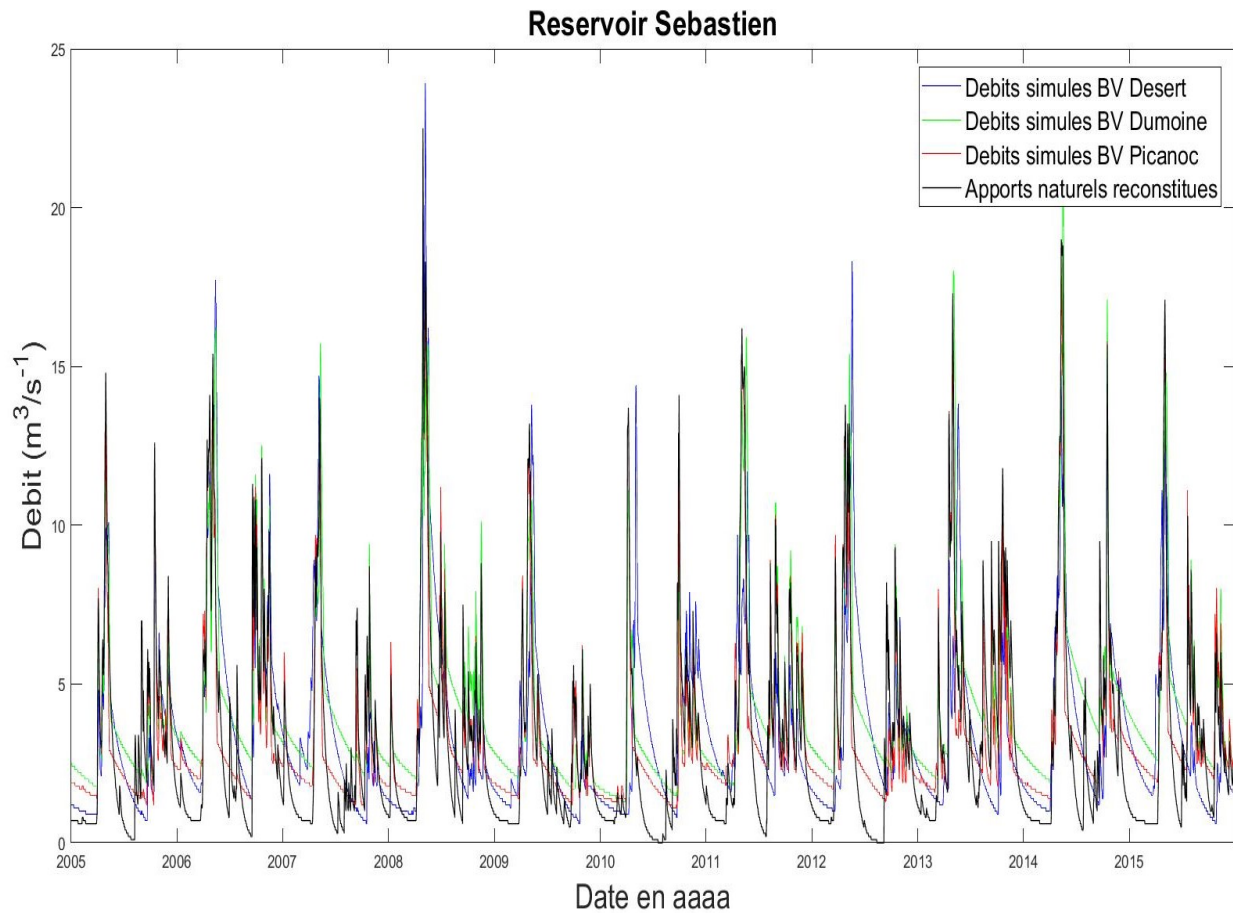
D.1 Hydrogramme reconstitué des apports naturels et des trois BV donneurs du sous-bassin Onatchiway



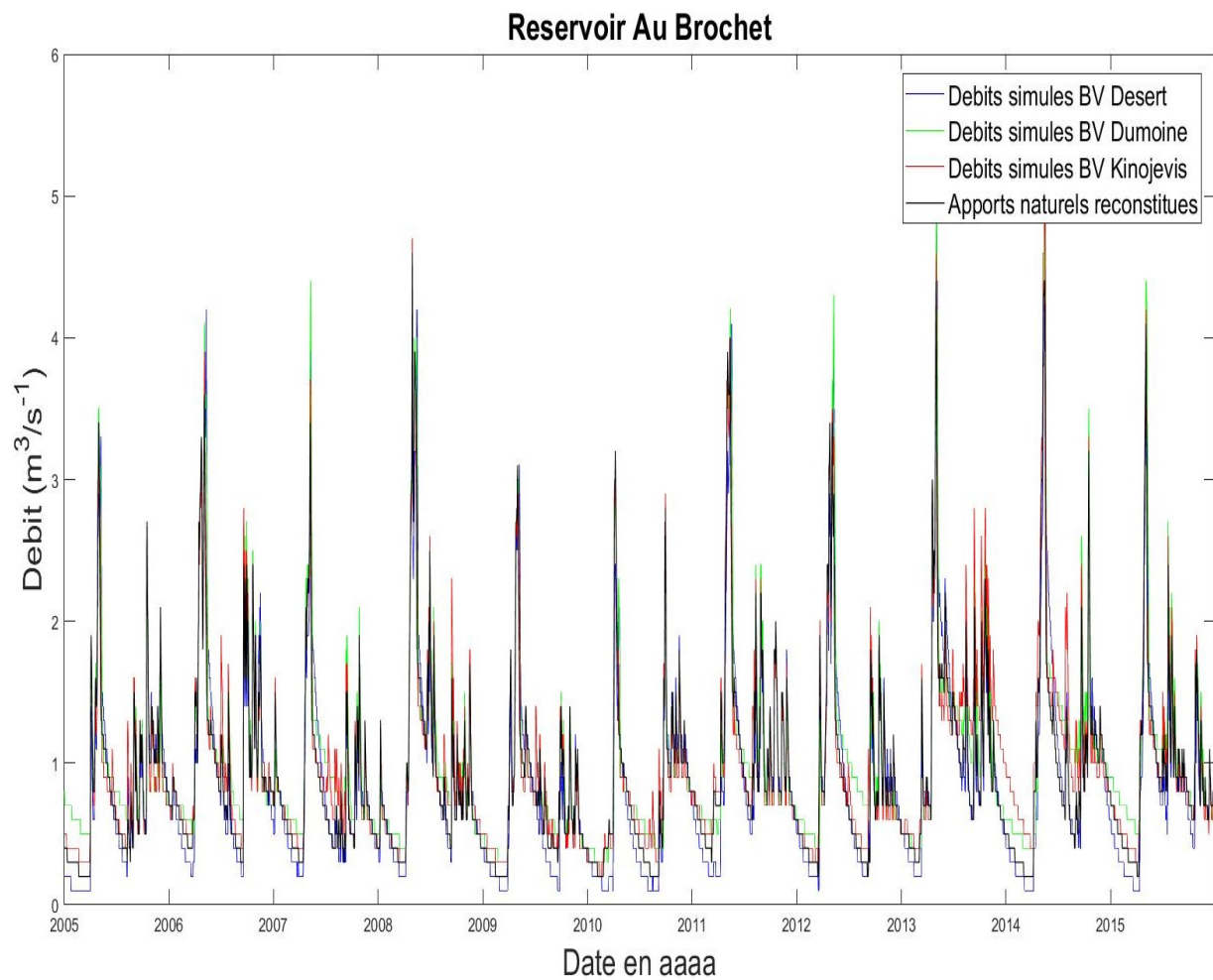
D.2 Hydrogramme reconstitué des apports naturels et des trois BV donneurs du sous-bassin Lamothe



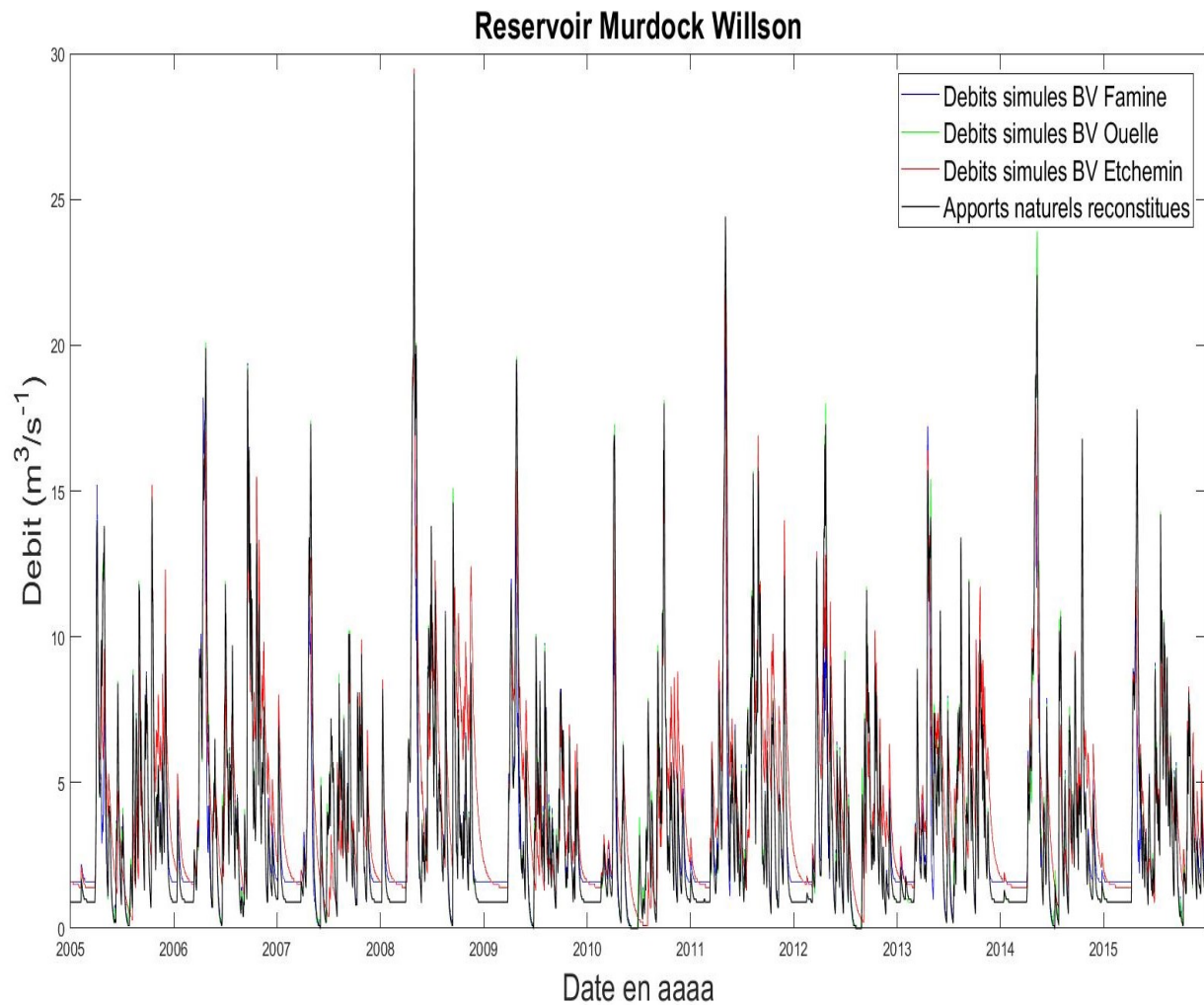
D.3 Hydrogramme reconstitué des apports naturels et des trois BV donneurs du sous-bassin Sébastien



D.4 Hydrogramme reconstitué des apports naturels et des trois BV donneurs du sous-bassin Au Brochet



D.5 Hydrogramme reconstitué des apports naturels et des trois BV donneurs du sous-bassin Murdock Willson



RÉFÉRENCES

- Abdulla, F.A., et Lettenmair D.P., 1997. "Development of regional parameter estimation equations for a macroscale hydrologic model." *Journal of Hydrology*, vol. 197: p. 230–257.
- Ahmed, E.S.M.S, et Mays, L.W. (2013). "Model for determining real-time optimal dam releases during flooding conditions." *Natural Hazards*, vol. 65, no. 3: p. 1849-1861.
- Ahn, J.M., Lee, S., et Kang, T. (2014). "Evaluation of dams and weirs operating for water resource management of the Geum River." *Science of the Total Environment*, vol. 478: p. 103-115.
- Alemu, E.T., Palmer R.N., Polebitski, A., et Meaker, B. (2011). "Decision support system for optimizing reservoir operations using ensemble streamflow predictions." *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 137, no. 1: p. 72-82.
- Anctil F., Rousselle J., et Lauzon N. (2012). *Hydrologie : cheminement de l'eau*. 2eme édition. Presses internationales Polytechnique, Montréal, Canada, 383 p.
- Anderson, E. (2006). *Snow accumulation and ablation model: SNOW-17*. Rapport technique, National Weather Service River Forecast System, Silver Spring, États-Unis 61p.
- Anderson, M.L., Chen, Z.Q., Kavvas, M.L., et Feldman, A. (2002). "Coupling HEC-HMS with atmospheric models for prediction of watershed runoff." *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 7, no. 4: p. 312-318.
- Arsenault, R., et Brissette, F.P. 2014. "Continuous streamflow prediction in ungauged basins: The effects of equifinality and parameter set selection on uncertainty in regionalization approaches." *Water Resources Research*, vol. 50(7): p. 6135-6153.
- Babazadeh, H., Sedghi H., Kaveh F., et Mousavi Jahromi H. 2007. "Performance evaluation of Jiroft storage dam operation using HEC-ResSim 2.0". Paper presented at the Eleventh International Water Technology Conference (IWTC11), Sharm El-Sheikh, Egypt, March 15-18.
- Bárdossy, A. (2007). "Calibration of hydrological model parameters for ungauged catchments." *Hydrology Earth System Sciences*, vol. 11, no. 2: p. 703-710.
- Barnett, T.P., J.C. Adam, and D.P. Lettenmaier. 2005. "Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions." *Nature*, vol. 438: p. 303-309.

- Bartholmes, J, et Todini, E. (2005). "Coupling meteorological and hydrological models for flood forecasting." *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 9, no. 4: p. 333-346.
- Bennett, J.C, Robertson D.E, Lal Shrestha, D.L., Wang, Q.J., Enever, D., Hapuarachchi, P., et Tuteja, N.K. (2014). "A system for continuous hydrological ensemble forecasting (SCHEF) to lead times of 9 days." *Journal of Hydrology*, vol. 519, (Part D): p. 2832-2846.
- Bergeron O. 2015. "Grilles climatiques quotidiennes du Programme de surveillance du climat du Québec. Version 1.2 – Guide d'utilisation." *Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction du suivi de l'état de l'environnement*, 33 p.
- Bergström, S. (1976). "Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. Swedish Meteorological and Hydrological Institute." *Rapport RHO* No. 7, Norrköping, Suède. 134p.
- Bongio, M., Avanzi, F., M., Avanzi, F., et De Michele, C. (2016). "Hydroelectric power generation in an Alpine basin: future water-energy scenarios in a run-of-the-river plant." *Advances in Water Resources*, vol. 94: p. 318-331.
- Boucher, M.A., Tremblay, D., Delorme, L., Perreault, L. et Anctil, F. (2012). "Hydro-economic assessment of hydrological forecasting systems." *Journal of Hydrology*, vol. 416-417: p. 133-144.
- Brunner, M.I, Viviroli, D., Sikorska, A.E., Vannier, O., Favre, A.C., et Seibert., J. (2017). « Flood type specific construction of synthetic design hydrographs." *Water Resources Research*, vol. 53, no. 2: p. 1390-1406.
- Brunner, M.I., Furrer, R., Sikorska, A.E, Viviroli, D., Seibert, J., et Favre, A.C. (2018). "Synthetic design hydrographs for ungauged catchments: A comparison of regionalization methods." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 32, no. 7: p. 1993–2023
- Calver, A. 1993. "The time-area formulation revisited." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water, Maritime and Energy*, vol. 101 no 1: p. 31-36.
- Candille, G. et Talagrand O. 2005. "Evaluation of probabilistic prediction systems for a scalar variable." *Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society*, vol. 131 no. 609: p. 2131–2150. Part A

- Carrillo, G., Troch, P.A, Sivapalan, M., Wagener, T., Harman, C., et Sawicz, K. (2011). "Catchment classification: hydrological analysis of catchment behaviour through process-based modeling along a climate gradient." *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 15, no. 11: p. 3411-3430.
- Che, D., et Mays L.W. 2015. "Development of an optimization/simulation model for real-time flood-control operation of river-reservoirs systems." *Water resources management*, vol 29, no 11: p. 3987-4005.
- Chow, V.T., Maidment D.R, et Mays L.W. 1988. *Applied hydrology*. New York : McGraw-Hill Book Company.
- Cloke, H.L., et Pappenberger, F. (2009). "Ensemble flood forecasting: A review." *Journal of Hydrology*, vol. 375, no. 3-4: p. 613-626.
- Dawson, C.W., Abrahart, R., Shamseldin, A., et Wilby. R. (2006). "Flood estimation at ungauged sites using artificial neural networks." *Journal of Hydrology*, vol. 319, no. 1-4: p. 39-409.
- Ergen, K., et Kentel, E. (2016). "An integrated map correlation method and multi-source sites drainage-area ratio method for estimating streamflows at ungauged catchments: A case study of the Western Black Sea Region, Turkey." *Journal of Environmental Management*, vol. 166: p. 309-320.
- Fallah-Mehdipour, E., Hadda O.B, et Mariño MA. 2013. "Developing reservoir operation decision rule by genetic programming." *Journal of Hydroinformatics*, vol. 15, no. 1: p. 103-119.
- Fazel, K., Scharffenberg, W.A., et Bombardelli, F. (2014). "Assessment of the Melt Rate Function in a Temperature Index Snow Model Using Observed Data." *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 19, no. 7: p. 1275-1282.
- Finger, D., Vis, M., Huss, M., et Seibert, J. (2015). "The value of multiple data set calibration versus model complexity for improving the performance of hydrological models in mountain catchments." *Water Resources Research*, vol. 51: p. 1939-1958.
- Franz, K. J., Hogue, T. S., et Sorooshian, S. (2008). "Operational snow modeling: Addressing the challenges of an energy balance model for National Weather Service forecasts." *Journal of Hydrology*, vol. 360, no. 1-4: p. 48-66.
- Gaudard, L., Gilli, M., et Romero, F. (2013). "Climate Change Impacts on Hydropower Management." *Water Resources Management*, vol. 27, no. 15: p. 5143-5156.

- Gneiting, T., Raftery A.E, Westveld A.H, et Goldman T. 2005. “Calibrated probabilistic forecasting using ensemble model output statistics and minimum CRPS estimation.” *Monthly Weather Review*, vol. 133, no. 5: p. 1098–1118.
- Golombek, R., Kittelsen, S.A.C., et Haddeland, I. (2012). “Climate change: Impacts on electricity markets in Western Europe.” *Climate Change*, vol. 113, no. 2: p. 357-370.
- Gould, NIM., Orban D., et Toint PL. (2003). “GALAHAD, a library of thread-safe Fortran 90 packages for large-scale nonlinear optimization.” *ACM Transactions on Mathematical Software*, vol 29, no. 4: p. 353–372.
- Gouvernement du Canada, Ministère des ressources naturelles Canada. Énergie. (4 janvier 2018). Faits sur l'énergie, Faits sur l'électricité. <http://www.rncan.gc.ca> (Page consultée le 19 avril 2019).
- Gouvernement du Canada, Ministère des ressources naturelles Canada (30 octobre 2017). Science de la Terre, Géographie, L'atlas du Canada, Explorez nos cartes, Cartes thématiques sélectionnées, Eau. <http://www.rncan.gc.ca> (Page consultée le 19 avril 2019).
- Hengeveld, H., Whitewood B., and Fergusson A. 2005. *An introduction to climate change: A Canadian perspective*. Toronto (Canada): Environment Canada.
- Hernández-Henríquez, M.A., Mlynowski, T.J., et Déry, S.J. (2010). “Reconstructing the natural streamflow of a regulated river: A case study of La Grande Rivière, Québec, Canada.” *Canadian Water Resources Journal*, vol. 35, no. 3: p. 301-316.
- Hewitt, C.D., Buontempo C., et Newton P.C. 2013. “Using climate predictions to better serve society's needs.” *Earth and Space Science News*, vol. 94 no. 11: p. 105-107.
- Hock, R. (2003). “Temperature index melt modelling in mountain areas.” *Journal of Hydrology*, vol. 282, no.1-4: p. 104–115.
- Hongjun, B., et Linna, Z. (2012). “Development and Application of an Atmospheric-Hydrologic-Hydraulic Flood Forecasting Model Driven by TIGGE Ensemble Forecasts.” *Acta Meteorologica Sinica*, vol. 26, no. 1: p. 93-102.
- Huaranga, U.F., Trudel M., et Leconte R. (2014). “Impacts and adaptation to climate change using a reservoir management tool to a northern watershed: application to Lièvre river watershed, Quebec, Canada.” *Water Resources Management*, vol. 28, no. 11, p. 3667-3680.

- Hundecha, Y., et Bárdossy, A. (2004). "Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model." *Journal of Hydrology*, vol. 292, no. 1-4: p. 281-295.
- James, L.D. (1972). "Hydrologic modeling, parameter estimation, and watershed characteristics." *Journal of Hydrology*, vol. 17, no. 4: p. 283-307.
- Kay, A.L., Jones, D.A., Crooks, S.M., Calver, A., et Reynard, N.S. (2006). "A comparison of three approaches to spatial generalization of rainfall-runoff models." *Hydrological Processes*, vol. 20, no. 18: p. 3953– 3973.
- Kim Y.O., Eum H.I, Lee E.G et Ko I.H (2007). "Optimizing operational policies of a Korean multi-reservoir system using sampling stochastic dynamic programming with ensemble streamflow prediction." *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 133, no. 1: p. 4-14.
- Kokkonen, T.S, Jakeman A.J, Young P.C, et Koivusalo J. 2003. "Predicting daily flows in ungauged catchments: model regionalization from catchment descriptors at the Coweeta Hydrologic Laboratory, North Carolina." *Hydrological Processes*, vol. 17 no.11: p. 2219-2238.
- Krau, S., (2005). *Présentation générale de SODAD, Super Outil D'Aide la Décision*. Rapport technique. IREQ-2005-077, 19p.
- Krzysztofowicz, R. (2001). "The case for probabilistic forecasting in hydrology." *Journal of Hydrology*, vol. 249, no.1-4: p. 2-9.
- Labadie, J., Baldo M., and Larson R. (2000). *MODSIM: River basin management decision support system*. Documentation and user manual. Dept. of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins.
- Lebecherel, A., Andréassian, V., et Perrin, C. (2016). "On evaluating the robustness of spatial-proximity-based regionalization methods." *Journal of Hydrology*, vol. 539: p. 196-203.
- Liang, X., Lettenmaier D.P., Wood E.F., et Burges S.J. 1994. "A Simple Hydrologically Based Model of Land Surface Water and Energy Fluxes for General Circulation Models". *Journal of Geophysical Research*, vol. 99 (D7): p. 14415–14428.
- Lim, Y.H., Hassell, J., et Teng, W. (2010). "Modeling hydrologic regime of a terminal lake basin with GCM down-scaled scenarios." Congrès international sur la modélisation environnemental et les logiciels de modélisation au service de l'environnement. Cinquième réunion biennale, Ottawa, Canada, 5-8 Juillet.

- Magette, W.L., Shanholtz, V.O., et Carr, J.C. (1976). "Estimating selected parameters for the Kentucky watershed model from watershed characteristics." *Water Resources Research*, vol. 12, no. 3, p. 472: 476.
- Matheson, J.E., et Winkler R.L. 1976. "Scoring rules for continuous probability distributions." *Management Science*, vol. 22, no.10 : p. 1087:1096.
- Maran, S., Decimi G., Garofalo E., Girardi P., et Marazzi R. 2006. "Valutazione dell'impatto dei vincoli ambientali sul funzionamento del parco di produzione, Ricerca di Sistema" Report CESI RICERCA 07000578.
- Maran, S., Volonterio M., et Gaudard L. 2014. "Climate change impacts on hydropower in an alpine catchment." *Environmental Science & Policy*, vol 43: p. 15-25.
- Mekis, É., et Vincent L.A. 2011. "An overview of the second generation adjusted daily precipitation dataset for trend analysis in Canada." *Atmosphere-Ocean*, vol. 49, no.3: p. 163-177.
- Merz, R., et Blöschl, G. (2004). "Regionalisation of catchment model parameters." *Journal of Hydrology*, vol. 287, no. 1-4: p. 95-123.
- Minville, M., Brissette F., Krau S. et and R. Leconte R. 2009. "Adaptation to climate change in the management of a Canadian water-resources system exploited for hydropower." *Water Resources Management*, vol. 23: p. 2965-2986.
- Nash, J.E., et Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, vol. 10, no. 3: p. 282- 290.
- Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., et Le Moine, N. (2008). "Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: a comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments." *Water Resources Research*, vol. 44, no. 3: p. 1-15.
- Oudin, L., Kay, A., Andréassian, V., et Perrin, C. (2010). "Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar?" *Water Resources Research*, vol. 46, no. 11.
- Pagano, T.C., Pappenberger, F., Wood, A.W., Ramos, M.H., Persson, A., et Anderson, B. (2016). "Automation and human expertise in operational river forecasting." *WIREs Water*, vol. 3: p. 692-705.

- Parajka, J., Merz, R., et Blöschl, G. (2005). "A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters." *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 9, no. 3: p. 157-171.
- Payne, J.T., Wood A.W., Hamlet A.F., Palmer R.N., et Lettenmaier D.P. 2004. "Mitigating the effects of climate change on the water resources of the Columbia river basin." *Climate Change*, vol. 62, no. 1-3 : p. 233-256.
- Peel, M.C, Chiew, F.H.S., Western, A.W., et McMahon, T.A. (2000). *Extension of unimpaired monthly streamflow data and regionalisation of parameter values to estimate streamflow in ungauged catchments*. National Land and Water Resources Audit. Center for environmental applied hydrology, Université de Melbourne, Australie, 37p.
- Perrin, C., Michel, C., et Andréassian, V. (2003). "Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation." *Journal of Hydrology*, vol. 279, no. 1-4: p. 275-289.
- Rani, D., et Moreira, M. (2010). "Simulation-optimization modeling: a survey and potential application in reservoir systems operation." *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 24, no. 6: p. 1107-1138.
- Razavi, T., et Coulibaly, P. (2013). "Streamflow prediction in ungauged basins: Review of regionalization methods." *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 18, no. 8: p. 958-975.
- Razavi, T., and P. Coulibaly. 2017. "An evaluation of regionalization and watershed classification schemes for continuous daily streamflow prediction in ungauged watersheds." *Canadian Water Resources Journal*, vol. 42, no.1: p. 2-20.
- Reichl, J.P.C., Western, A.W., McIntyre, N.R., et Chiew, F.H.S. (2009). "Optimization of a similarity measure for estimating ungauged streamflow." *Water Resources Research*, vol. 45, no. 10: p. 1-15.
- Rousselle, J., Watt W.E, Lathem, K.W., Neill C.R., Richards, T.L. (1990). *Hydrologie des crues au Canada – Guide de planification et de conception*. Comité associé d'hydrologie, Conseil National de Recherches du Canada, Ottawa, Canada, 277p.
- Salam, B.G., A. Poulin, MA. Boucher and R. Arsenault. 2016. "Added value of alternative information in interpolated precipitation datasets for hydrology". *Journal of hydrometeorology*, vol. 18
- Singh V.P. (1995). *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications, Colorado, USA, 1144 p.

- Sisay, E., Halefom, A., Khare, D., Singh, L., et Worku, T. (2017). “Hydrological modelling of ungauged urban watershed using SWAT model.” *Modeling Earth Systems and Environment*, vol. 3 no. 2: p. 693-702.
- Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S.W., Gupta, V.K., Karambiri, H., Lakshmi, V., Liang, X., et al. (2003). “IAHS decade on predictions in ungauged basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological science.” *Hydrological Sciences Journal*, vol. 48, no. 6: p. 857-880.
- SNC Lavalin. November 2000 “Description des aménagements de la région du Saguenay » Report for Abitibi Consolidated, division Hydro-Saguenay, Quebec, Canada, 257 p.
- Sun, W., Ishidaira, H., et Bastola, S. (2012). “Calibration of hydrological models in ungauged basins based on satellite radar altimetry observations of river water level.” *Hydrological Processes*, vol. 26, no. 23: p. 3524-3537.
- Swain, J.B., et Patra, K.C. (2017). “Streamflow estimation in ungauged catchments using regionalization techniques.” *Journal of Hydrology*, vol. 554: p. 420-433.
- Taylor, A.L., Dessai, S., et Bruine de Bruin, W. (2015). Communicating uncertainty in seasonal and interannual climate forecasts in Europe. *Philosophical Transactions of the Royal Society. A*. 373: 20140454. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0454>.
- United States Army Corps of Engineers (USACE). (2013). *HEC-geoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension User’s Manual Version 10.1*. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, California, USA, 193pp.
- United States Army Corps of Engineers (USACE). (2016). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS User’s Manual*. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, California, USA, 614pp.
- United States Army Corps of Engineers (USACE). (2003). *HEC-ResPRM Reservoir Model Program User’s Manual Version 1.0*. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, California, USA, 106pp.
- United States Army Corps of Engineers (USACE). (2013). *HEC-ResSim Reservoir System Simulation User’s Manual Version 3.1*. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, California, USA, 556pp.

- United States Army Corps of Engineers (USACE). (2017). *HEC-RTS Real Time Simulation User's Manual Version 3.0*. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, California, USA, 443pp.
- United States Department of Agriculture (USDA). (1972). *National Engineering Handbook, Section 4*. Washington, D.C: Soil Conservation Service.
- United States Department of Agriculture (USDA). (1986). *Urban hydrology for small watersheds, Technical Release 55*. Washington, DC: Soil Conservation Service.
- Uysal, G., A. Sensoy, A.A. Sorman, T. Akgun, and T. Gezgin. (2016). "Basin/Reservoir System integration for real time reservoir operation." *Water Resources management*, vol. 30, no. 5: p. 1653-1668.
- Vanderbei RJ. (2006) "LOQO user's manual-version 4.05". Princeton University
- Valizadeh, N., Mirzaei, M., Allawi, M.F., Afan, H.A., Mohd, N.S., Husain, A, et El-Shafie. A. (2017). "Artificial intelligence and geo-statistical models for stream-flow forecasting in ungauged stations: state of the art." *Nat Hazards*, vol. 86: p. 1377-1392.
- Verdhen, A., Chahar, B., et Sharma, O. (2013). *Snowmelt runoff simulation using HEC HMS in a Himalayan watershed*. Présenté dans le congrès du World Environmental and Water Resources 2013, Cincinnati, États-Unis.
- Xu, C.-Y. (2003). "Testing the transferability of regression equations derived from small sub-catchments to a large area in central Sweden." *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 7: p. 317–324.
- Yang, X., Magnusson, J., Rizzi, J., et Xu, C.Y. (2018). "Runoff prediction in ungauged catchments in Norway: comparison of regionalization approaches." *Hydrology Research*, vol. 49, no. 2: p. 487-505.
- Yasmeen, Z., Zaidi, A., et M. Afzaal. (2016). "Rainfall Runoff Modeling using Geo-spatial Techniques in Tarbela Sub-catchment." *Pakistan Journal of Meteorology*, vol. 12, no. 24: p. 1-13.
- Yeh W. W.G. (1985). "Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review." *Water Resources Research*, vol. 21, no. 12: p. 1797-1818.
- Young, A.R. (2006). "Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model." *Journal of Hydrology*, vol. 320: p. 155-172.

- Zagona, E., Fulp T., Shane R., Magee T., et Goranflo H. (2001). "RiverWare : A generalized tool for complex reservoir systems modeling." *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 37, no. 4: p. 913-929.
- Zambelli M., Siqueira T.G., Cicogna M. et Soares S. (2006). "Deterministic versus stochastic models for long term hydrothermal scheduling." Conference Institute of Electrical and Electronics Engineers, Power Engineering Society General Meeting, IEEE, New York, États-Unis.
- Zekelew, M.B, et Alfrendsen, K. (2014). "Use of Cokriging and map correlation to study hydrological response patterns and select reference stream gauges for ungauged catchments." *Journal of Hydrology Engineering*, vol. 19: p. 388-406.
- Zhang, Y., et Chiew, F.H.S. (2009). "Relative merits of different methods for runoff predictions in ungauged catchments." *Water Resources Research*, vol. 45, no. 7.
- Zhang, X., L.A.Vincent, W.D. Hogg, A. Niitsoo. 2000. "Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century." *Atmosphere–Ocean*, vol. 38, no. 3: p. 395-429.
- Ziaei, M., Shui, L.T., et Goodarzi, E. (2012). "Optimization and simulation modeling for operation of the Zayandeh Rud Reservoir." *Water International Journal*, vol. 37, no. 3: p. 305-318.
- Zsoter E., Pappenberger F., Smith P., Emerton R.E., Dutra E., Wetterhall F., Richardson D., Bogner K. et Balsamo G. (2016). "Building a Multimodel Flood Prediction System with the TIGGE Archive." *Journal of Hydrometeorology*, vol. 17, no. 11: p. 2923-29